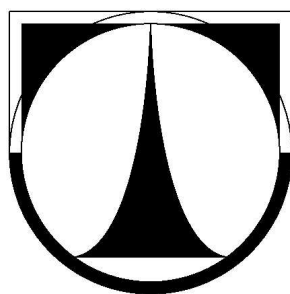


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**



**MOŽNOSTI VÝROBY OBJEMNÝCH ZVUKOVĚ  
POHLTIVÝCH MATERIÁLŮ**

**POSSIBILITIES OF PRODUCTION OF BULKY  
SOUND ABSORPTIVE MATERIALS**

**LIBEREC 2010**

**ALEXANDRA MITBAUEROVÁ**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**

**KATEDRA NETKANÝCH TEXTILŮ**

**MOŽNOSTI VÝROBY OBJEMNÝCH ZVUKOVĚ  
POHLTIVÝCH MATERIÁLŮ**

**POSSIBILITIES OF PRODUCTION OF BULKY  
SOUND ABSORPTIVE MATERIALS**

**Autor diplomové práce:** Alexandra Mitbauerová

**Vedoucí diplomové práce:** Ing. Klára Kalinová, Ph.D.

Rozsah práce:

<b>Stran</b>	<b>Obrázky</b>	<b>Tabulky</b>	<b>Prameny</b>	<b>Přílohy</b>
65	47	10	39	8

V Liberci dne 3. května 2010

## Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 3. května 2010

.....

Podpis

### **Poděkování**

Děkuji Ing. Kláře Kalinové, Ph.D. za vedení a cenné rady při tvorbě diplomové práce. Poděkování patří i Ing. Michalu Komárkovi a Ing. Filipu Sanetrníkovi za jejich pomoc a ochotu při vzniku této práce. Nakonec děkuji i všem ostatním, kteří svými připomínkami a náměty přispěli ke vzniku této práce.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá studiem zvukově pohltivých vlastností vláknenné vrstvy ze směsi vláken vytvořených technologiemi meltblown a elektrostatického zvlákňování. Součástí práce je úvodní část, která je souhrnem teoretických poznatků o principech pohlcování zvuku různých materiálů v souvislosti s jejich strukturou. Praktická část se zabývá vývojem principiálně nového zvukově pohltivého materiálu a stanovením činitele zvukové pohltivosti vláknenných vrstev v závislosti na jejich měnících se parametrech. Výsledkem je pak vyhodnocení vlivu různých parametrů na činitel zvukové pohltivosti.

**Klíčová slova:** činitel zvukové pohltivosti, meltblown, elektrostatické zvlákňování

## **Annotation**

This thesis deals with study of sound-absorptive properties of the fibrous layer of fibre compound that is created by the meltblown technology and electrospinning. The introductory part is a summary of theoretical findings on principles of sound absorption of various materials in context with their structure. The practical part deals with development of a fundamentally new sound-absorptive material and determination of the sound absorption coefficient of the fibrous layer in dependence on varying parameters. The resulting part is about evaluation of influence of various parameters on the sound absorption coefficient.

**Key words:** sound absorption coefficient, meltblown, electrospinning

**Obsah**

<b>Seznam zkratk a symbolů .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2 Teorie .....</b>	<b>13</b>
2.1 Teorie zvuku .....	13
2.1.1 Podstata akustiky .....	13
2.1.2 Základní pojmy a veličiny akustiky .....	13
2.1.3 Činitel zvukové pohltivosti .....	15
2.2 Měření akustických vlastností .....	16
2.2.1 Mechanismus pohlcování zvuku .....	16
2.2.2 Měření činitele zvukové pohltivosti .....	17
2.2.3 Dozvuková místnost .....	18
2.2.4 Impedanční trubice .....	19
2.3 Zvukově pohltivé materiály .....	19
2.3.1 Porézní materiály .....	19
2.4 Rezonančně pohltivé soustavy .....	21
2.4.1 Kmitající membrány .....	21
2.4.2 Kmitající desky .....	24
2.4.3 Helmholtzův rezonátor .....	25
2.5 Výroba NT .....	26
2.5.1 Elektrostatické zvlákňování .....	26
2.5.2 Polyvinylalkohol .....	28
2.5.3 Technologie Meltblown .....	28
2.5.4 Polypropylen .....	31
<b>3 Rešerše .....</b>	<b>33</b>
3.1 Akustické vlastnosti NT .....	33
3.1.1 Mechanismus absorpce zvuku vlákněným materiálem .....	33
3.1.2 Faktory ovlivňující zvukovou pohltivost NT .....	33
3.1.3 Aplikace zvukově pohltivých materiálů .....	38
<b>4 Experimentální část .....</b>	<b>39</b>

4.1	Cíl.....	39
4.2	Úkoly .....	39
4.3	Použité zařízení.....	39
4.3.1	Prototyp zařízení kombinující proces výroby vláken technologií MB a elektrostatického zvlákňování z válečku .....	39
4.3.2	Etážový lis.....	41
4.3.3	Dvou-mikrofonová impedanční trubice Brüel and Kjær .....	41
4.3.4	Tloušťkoměr .....	43
4.3.5	Rastrovací elektronový mikroskop .....	44
4.3.6	Analytické váhy .....	44
4.3.7	Lucia G .....	45
4.4	Výroba vzorků .....	45
4.4.1	Experiment č. I.....	47
4.4.2	Experiment č. II .....	47
4.4.3	Experiment č. III.....	48
4.4.4	Experiment č. IV.....	48
4.4.5	Experiment č. V .....	49
4.4.6	Experiment č. VI.....	49
4.5	Označení vzorků .....	49
4.6	Postup měření činitele zvukové pohltivosti $\alpha$ .....	50
4.7	Statistické vyhodnocení .....	51
4.8	Výsledky a zhodnocení měření.....	52
4.8.1	Závislost činitele zvukové pohltivosti $\alpha$ na plošné hmotnosti vláknenné vrstvy ..	53
4.8.2	Závislost činitele zvukové pohltivosti $\alpha$ na množství nanovláken ve vláknenné vrstvě .....	56
4.8.3	Vliv složení materiálu na činitel zvukové pohltivosti $\alpha$ .....	59
<b>5</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>65</b>

## Seznam zkratk a symbolů

$f$	[Hz]	frekvence
$T$	[s]	perioda
$\omega$	[Hz]	úhlová frekvence
$\pi$	[-]	číslo pí
$\lambda$	[m]	vlnová délka
$c$	[m/s]	rychlost šíření akustické vlny
$v$	[m/s]	akustická rychlost
$v_0$	[m/s]	amplituda akustické rychlosti
$u_0$	[m]	amplituda akustické výchylky
$I_1$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita zvuku vlny odražené
$I_2$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita zvuku vlny pohlcené
$I_3$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita zvuku vlny vyzářené
$I_4$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita zvuku vlny prošlé
$I_5$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita zvuku vlny vyzářené do druhého poloprostoru
$I_6$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita zvuku vlny ve formě chvění
$I_7$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita zvuku přeměněná na teplo
$\alpha$	[-]	činitel zvukové pohltivosti
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$T_1$	[s]	doba dozvuku prázdné komory
$T_2$	[s]	doba dozvuku komory se vzorkem pohltivého materiálu
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem dozvukové komory
$m_a$	[-]	činitel útlumu vlivem absorpce zvuku ve vzduchu



$\alpha_1$	[-]	činitel pohltivosti prázdné dozvukové komory
$c_r$	[-]	činitel poréznosti
$V_p$	[m <sup>3</sup> ]	objemů pórů
$V_a$	[m <sup>3</sup> ]	objemu látky
$R_s$	[Ns/m <sup>3</sup> ]	stejnoseměrný akustický odpor
$k$	[-]	činitel struktury
$n$	[-]	exponent
$m$	[kg]	hmotnost
$k$	[N/m]	tuhost pružiny
$f_r$	[Hz]	rezonanční kmitočet soustavy
$p_b$	[Pa]	barometrický tlak vzduchu
$m''$	[kg/m <sup>2</sup> ]	plošná hmotnost membrány
$d$	[m]	tloušťka vzduchového polštáře
$F_r$	[N]	celková napínací síla
$r$	[m]	poloměr membrány
$c_m$	[m/s]	rychlost příčné vlny šířící se membránou
$v$	[N/m]	radiální napínací síla
$k_m$	[m <sup>-1</sup> ]	vlnové číslo
$f_{pq}$	[Hz]	kmitočet obdélníkové stěny
$a$	[m]	rozměr desky
$b$	[m]	rozměr desky
$p$	[-]	konstanta udávající řád kmitočtu
$q$	[-]	konstanta udávající řád kmitočtu

$B$	[N/m]	ohybová tuhost desky
$R$		třecí odpor
$S_H$	[m <sup>2</sup> ]	průřez hrdla rezonátoru
$V_H$	[m <sup>3</sup> ]	objem rezonátoru
$l'$	[m]	délka hrdla rezonátoru
NT		netkané textilie
MB		meltblown
PVA		polyvinylalkohol
PP		polypropylen
et al.		et alii (a jiní)
tex	[g/km]	jednotka jemnosti
$\sigma$	[-]	porozita
$V_{\text{vzduchu}}$	[m <sup>3</sup> ]	objem vzduchu v látce
$V_{\text{celkové}}$	[m <sup>3</sup> ]	celkový objem látky
$R$	[Pa · s · m <sup>-2</sup> ]	specifický odpor vzduchu
$V$	[m/s]	rychlost průchodu částice vrstvou
$\Delta p$	[N/m <sup>2</sup> ]	rozdíl akustického tlaku před a za vrstvou
$L$	[m]	tloušťka
$n_s$	[-]	stupeň stlačení
$h$	[m]	tloušťka vrstvy po stlačení
$h_0$	[m]	počáteční tloušťka vrstvy
PL		polyester
co-PL		kopolyester
PU		polyuretan

# 1 Úvod

Zvuk a sním související hluk je jedním z mnoha faktorů nepříznivě ovlivňujících lidské pohodlí a snižujících komfort lidského života. Proto je důležité se jím zabývat a regulovat jeho nežádoucí a často škodlivé účinky na lidský organismus. Materiálů pohlcujících zvuk, tzv. absorbérů, je velké množství, a to textilních i netextilních. K významným absorpčním prvkům pak patří netkané vlákenné materiály a pěny. Oblast využití absorbérů nežádoucího zvuku je široká a k významným patří stavebnictví, automobilový, letecký a strojí průmysl.

V oboru zvukové absorpce bylo již prezentováno mnoho způsobů a metod výroby vlákenných materiálů navržených pro pohlcování nežádoucího zvuku. Převážná většina autorů se zabývala popisem vlastností a základních parametrů vlákenné vrstvy, které proces zvukové absorpce ovlivňují. S postupem inovací v oboru výroby vlákenných vrstev v posledních letech současně dochází i k rozšíření možností jak vyrábět materiály se stále dokonalejšími vlastnostmi pro zvukovou absorpci. Jednou z těchto inovací je průmyslový způsob výroby nanovlákenných vrstev. Experimentálně bylo zjištěno, že nanovlákná v kombinaci s jiným vlákenným materiálem mohou značnou měrou přispět k dokonalejšímu pohlcování zvuku absorbérem. Tato práce pak navazuje na myšlenku využít nanovlákná v kombinaci s dalším materiálem. Základem bude vyrobit vlákennou vrstvu ze směsi nanovláken a vláken typu meltblown.

Teoretická část práce se zabývá popisem základních parametrů akustiky, které souvisí s pohlcováním zvuku různými materiály. Část textu se věnuje činiteli zvukové pohltivosti  $\alpha$  a metodám jeho měření. Následuje stručný popis mechanismů absorpce různými typy materiálů a základní postupy výroby vláken metodou elektrostatického zvlákňování z válečku a metodou meltblown. Poslední část pak zachycuje poznatky mnoha autorů o hlavních parametrech vlákenných vrstev, které různými způsoby ovlivňují proces zvukové absorpce. Většina autorů přisuzuje význam jednotlivým parametrům s ohledem na daný účel použití absorbéru. Významný přínos pro tuto práci pak má fakt, že běžné vlákenné materiály všeobecně lépe pohlcují v oblasti středních a vyšších frekvencí a je proto důležité směřovat další vývoj vlákenných absorpčních prvků na oblast pohlcování nízkých frekvencí. Čemuž by měla pomoci právě nanovlákná.

Experimentální část se zabývá optimalizací výroby vlákenné vrstvy ze směsi PVA nanovláken a PP vláken meltblown danými postupy, souvisejícími s parametry, které chceme ve vrstvě měnit a které by měli potvrdit zadané předpoklady. Výsledkem je pak grafická závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci a vyhodnocení vlivů jednotlivých parametrů. Činitel zvukové pohltivosti je měřen pomocí dvoumikrofonové impedanční trubice.

## 2 Teorie

### 2.1 Teorie zvuku

Záměrem této kapitoly je poskytnout základní informace o akustice a hlavních parametrech a veličinách, které souvisejí s jejím popisem.

#### 2.1.1 Podstata akustiky

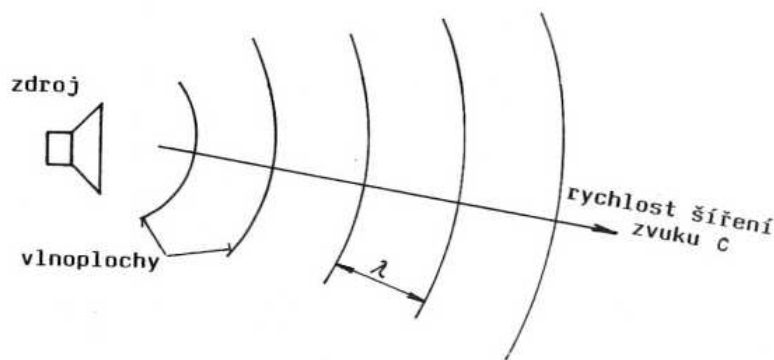
Akustika je věda zabývající se fyzikálními ději, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho dalším šířením a vnímáním zvuku sluchovým orgánem. Vlnění hmotného prostředí se nazývá zvuk[2].

#### 2.1.2 Základní pojmy a veličiny akustiky

**Zvuk** je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 20 až 20000 kmitů za sekundu, které se šíří konečnou rychlostí určitým prostředím. Akustická vlna se ve vzduchu pohybuje rychlostí přibližně 340 m/s[1].

Zvuk se může šířit v plynech, kapalinách i pevných látkách ve formě akustického vlnění. V homogenním izotropním prostředí se šíří vlnění přímočaře. Podle toho, zda částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění nebo kolmo k němu, dělíme vlnění na podélné a příčné. Zatímco u podélného vlnění je směr kmitů jednoznačně dán směrem šíření vlnění, u příčného vlnění musíme udávat též rovinu, ve které dochází k příčným kmitům[1].

Důležitou skutečností je, že se částice jednosměrně nepohybují se šířícím se vlněním, nýbrž kmitají pouze kolem svých rovnovážných poloh. Dalším významným faktem je, že šíření akustického vlnění je spojeno s přenosem energie. Akustické vlnění postupuje prostředím od zdroje zvuku ve vlnoplochách (obr. 1). Vlnoplocha se vyznačuje tím, že v jejích všech bodech je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Kolmice na vlnoplochu se nazývá akustickým paprskem[1].



Obr. 1: Šíření zvuku od zdroje[1]

**Kmitočet** neboli frekvence  $f$  [Hz] určuje počet kmitů za sekundu, které vykoná kmitající hmotný bod. Mezi dobou kmitu a frekvencí platí jednoduchý vztah

$$f = \frac{1}{T}$$

Dále můžeme vyjádřit úhlový kmitočet  $\omega$  jako

$$\omega = 2\pi f$$

**Vlnová délka** nebo též délka vlny  $\lambda$  [m] je vzdálenost mezi nejbližšími dvěma body bodové řady, u nichž je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Tedy jedná se o vzdálenost, kterou zvuková vlna urazí za dobu jednoho kmitu  $T$ . Délka vlny je důležitým akustickým parametrem, který umožňuje modelování v akustice. Vztah popisující vlnovou délku

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

kde je  $c$  [m/s] rychlost šíření akustické vlny

$f$  [Hz] frekvence.

Rychlost s jakou kmitají jednotlivé částičky prostředí, kterým se šíří akustická vlna, nazýváme **akustickou rychlostí**  $v$  [m/s]. Výraz pro její výpočet je parciální derivací akustické výchylky podle času.

$$v = \omega \cdot u_0 \cdot \cos \omega \left( \tau \mp \frac{x}{c} \right) = v_0 \cdot \cos \omega \left( \tau \mp \frac{x}{c} \right)$$

Kde  $\omega$  je úhlová frekvence,  $u_0$  pak amplituda akustické výchylky a jejich součin dává amplitudu akustické rychlosti  $v_0$ [1].

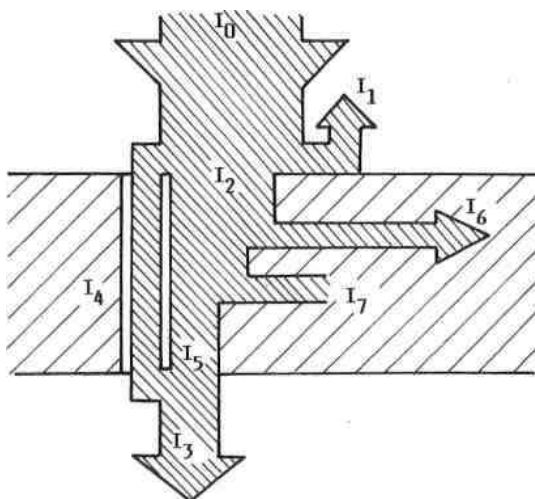
**Akustický tlak**, nebo hladina akustického tlaku, je následkem změn tlaku vzduchu způsobených zvukovými vlnami. Je měřítkem zvukové energie emitované zdrojem hluku, vyjadřuje se v decibelech. Nejnižší akustický tlak, který je ještě lidským uchem vnímán, se nazývá práh slyšitelnosti. Nejvyšší akustický tlak, který ještě lidské ucho snese, se nazývá práh bolesti[2].

### 2.1.3 Činitel zvukové pohltivosti

Existuje několik faktorů, kterými lze hodnotit výkon zvukově pohltivých materiálů. Jde o experimentálně zjištěné konstanty jako činitel zvukové pohltivosti, odrazivost a akustická impedance. Existuje několik metod, jak tyto parametry určit. Téměř vždy jsou založeny na vystavení zkoumaného materiálu zvuku o známé frekvenci a měření jejich účinků ve zvukovém poli. Výkonnost zvukově pohltivých materiálů je hodnocena pomocí součinitele zvukové pohltivosti. V této práci jde o jeden z nejdůležitějších parametrů, kterým budeme popisovat akustické vlastnosti vyrobené vlákněné vrstvy. Jeho průběh bude zjišťován na dvoumikrofonové impedanční trubici.

Chování akustické energie při dopadu na nějakou překážku je znázorněno na obrázku 2.  $I_0$  je akustický výkon dopadající na  $1 \text{ m}^2$  stěny a jedná se o intenzitu zvuku. Ta se při dopadu na překážku dělí na několik složek:

- a)  $I_1$  – intenzita zvuku vlny odražené
- b)  $I_2$  – intenzita zvuku vlny pohlcené
- c)  $I_3$  – intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem
- d)  $I_4$  – intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry
- e)  $I_5$  – intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru
- f)  $I_6$  – intenzita zvuku vlny, která je vedená ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí
- g)  $I_7$  – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo



Obr. 2: Schéma rozdělení akustické energie při dopadu zvukové vlny na stěnu[1]

Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk charakterizujeme hodnotou činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$ , který je definován jako poměr energie  $I_2$ , pohlcené určitou plochou, k energii  $I_0$ , která na tuto plochu dopadá, což je vyjádřeno výrazem

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0}$$

Z tohoto vztahu je patrné, že činitel zvukové pohltivosti je bezrozměrné číslo, jehož velikost se může pohybovat v intervalu od 0 do 1. Stěna pohlcující zvuk úplně, má činitel zvukové pohltivosti  $\alpha=1$ , zatímco stěna, dokonale odrážející zvuk má tento činitel roven 0. Součin  $\alpha \cdot S$  [ $\text{m}^2$ ] udává tzv. celkovou pohltivost stěny. Činitel pohltivosti dané látky nebo stěny je závislý na úhlu a kmitočtu dopadající zvukové vlny[1].

## 2.2 Měření akustických vlastností

V této části nastíníme jednoduchý popis mechanismů, k jakým ve vlákenné vrstvě může docházet vlivem působení zvuku a jakými postupy je možno pohltivost daných vrstev zjišťovat.

### 2.2.1 Mechanismus pohlcování zvuku

Pod pojmem pohlcování zvuku máme z fyzikálního hlediska na mysli přeměnu zvukové energie v energii jinou, obvykle tepelnou. Z tohoto hlediska můžeme principy přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách rozdělit na tři skupiny:



a) přeměny vznikající třením

K přeměně akustické energie vlivem tření dochází tehdy, pohybuje-li se vzduch v blízkosti pevné stěny. Aby bylo přeměněno dostatečné množství energie, musí být plocha, na níž nastává tření, značně velká. Proto se k pohlcování zvuku tímto způsobem dobře hodí látky porézní, u nichž se zvuk šíří v látce jemnými póry, jejichž celková plocha je značně velká vzhledem k objemu látky[1].

b) přeměny vznikající poklesem akustického tlaku

Při šíření zvukové vlny látkou nastává v určitých místech zhuštění molekul vzduchu, což se projeví současně stoupnutím celkového tlaku. Jestliže dojde z jakýchkoliv důvodů ke snížení tlaku, sníží se i potenciální energie nashromážděná v uvažovaném místě a tím se zmenší i energie zvukové vlny. Jiný způsob snížení tlaku nastává při šíření zvuku pevnými látkami nebo pevnou kostrou nějaké porézní látky. Například mění-li se u vláknité látky průřez kostry, dochází v místech malého průřezu ke značnějšímu stoupnutí teploty, a jestliže je látka dobrým vodičem tepla, dojde k vyrovnání teplot s okolím a tím opět k snížení tlaku[1].

c) přeměny vznikající nepružnou deformací těles

K přeměnám zvukové energie vlivem nepružné deformace těles dochází u látek, které vykazují tzv. pružnou hysterezi. Stlačíme-li takovou látku určitou silou, nevrátí se tato látka do původního stavu, přestane-li síla působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce nazpět získaná pružností tělesa při návratu do původního stavu a jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem činitele vnitřního tlumení zvuku v materiálu[1].

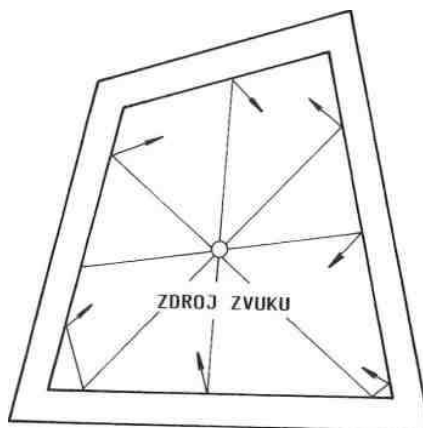
## 2.2.2 Měření činitele zvukové pohltivosti

Většinou bývá užíváno několika různých metod pro objektivní hodnocení zvukové pohltivosti materiálů. Podrobný popis techniky používané v tomto výzkumu je uveden v experimentální části. Metody užívané pro charakterizování zvukově pohltivých materiálů jsou:

- dozvuková místnost
- impedanční trubice

### 2.2.3 Dozvuková místnost

Tato metoda měření činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  poskytuje výsledky nejvíce se blížíci praxi. Činitel  $\alpha$  daného materiálu se vypočte z rozdílu měřených dob dozvuku prázdné dozvukové komory, schématicky znázorněné na obrázku 3, a dozvukové komory částečně obložené pohltivým materiálem.



Obr. 3: Dozvuková komora[1]

Dozvukové komory jsou konstruovány tak, že jednotlivé stěny nejsou paralelní, ale zato hladké a akusticky tvrdé. Také jejich objem musí být dostatečně velký, aby se mohlo vytvořit difúzní akustické pole již od velmi nízkých kmitočtů.

Pohltivost zkoušeného materiálu pak můžeme stanovit podle vzorce

$$\alpha = \frac{V \cdot \left[ \frac{55,3}{c} \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) - 4 \cdot m_a \right]}{S} + \alpha_1$$

kde je  $T_1$  doba dozvuku prázdné komory

$T_2$  doba dozvuku komory se vzorkem pohltivého materiálu

$V$  [m<sup>3</sup>] objem dozvukové komory

$c$  [m/s] rychlost šíření zvuku ve vzduchu

$m_a$  [-] činitel útlumu vlivem absorpce zvuku ve vzduchu

$S$  [m<sup>2</sup>] plocha měřeného vzorku

$\alpha_1$  [-] činitel pohltivosti prázdné komory[1].

### 2.2.4 Impedanční trubice

Jedná se o metodu stojatého vlnění, ta nám umožňuje zjišťovat součinitel  $\alpha$  pouze pro kolmý dopad vln. Činitel  $\alpha$  je proto někdy nazýván jako kolmý. Metoda impedanční trubice používá při měření rovinnou zvukovou vlnu, která dopadá přímo na materiál. V této práci je užívána právě tato metoda, která je rychlejší a vyžaduje relativně malé kruhové vzorky o rozměru 29 mm a 100 mm v průměru. Jelikož se zvuková vlna šíří pouze v prostoru trubky, je třeba, aby velikost vzorku byla taková, aby úplně vyplnila průřez trubky. Tato metoda má dvě různé techniky měření součinitele zvukové pohltivosti  $\alpha$ :

- 1) využívá k měření  $\alpha$  pohyblivý mikrofón a frekvenční spektrometr, který snímá  $\alpha$  v různých místech
- 2) dvoumikrofonová impedanční trubice - v této technice je využíváno jako zdroje zvuku široké pásmo náhodného signálu (popsáno v kap. 4.3.3). Koeficient  $\alpha$  může být ve srovnání s první metodou získán mnohem snadněji a rychleji[31].

## 2.3 Zvukově pohltivé materiály

Materiály, které jsou schopny snížit akustickou energii dopadající zvukové vlny, se nazývají zvukově pohltivé materiály. Jde o materiály schopné přeměnit akustickou energii na tepelnou. Jsou to například materiály, které umožňují zvukové vlně projít skrz a tím absorbovat zvuk nebo se při dopadu zvukové vlny na povrch rozkmitají.

### 2.3.1 Porézní materiály

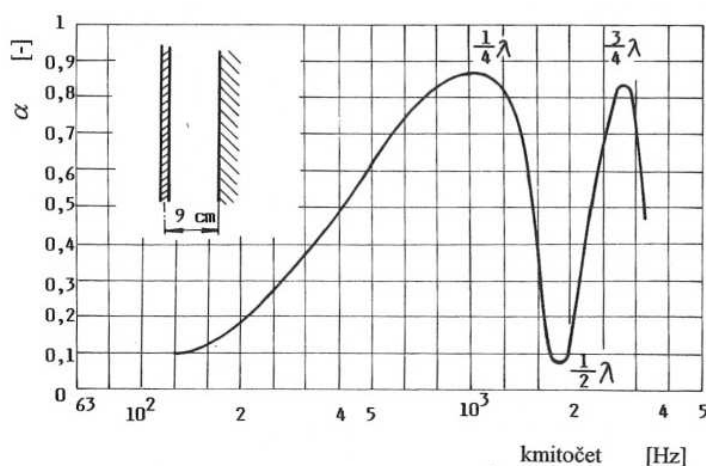
Pod pojmem porézní látka máme v akustice obvykle na mysli pevnou látku, v jejímž objemu se nacházejí malé dutinky vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu látky je dosti značný a činí asi 60 až 95 % celkového objemu. Materiál tvořící kostru látky je buď vláknitý, nebo má strukturu ztuhlé pěny. Má-li látka dobře pohlcovat zvuk, musejí být její póry navzájem spojeny, aby se jimi zvuk mohl šířit látkou dále, tedy aby mohl vzduch při akustickém kmitání proudit. Jedině tak bude možno využít principu přeměny akustické energie vlivem tření. Póry nemusejí být spojeny u látek, jejichž kostra je velmi poddajná, elastická, takže zvuk do ní snadno z pórů přechází. Příkladem takových látek jsou pěněné měkké umělé hmoty[3].

Z hlediska fyzikálního můžeme u porézních látek s tuhou kostrou stanovit jejich pohltivé vlastnosti, známe-li jejich:

- činitel poréznosti  $c_r$ , definovaný jako poměr objemů pórů  $V_p$  k celkovému objemu látky  $V_a$
- stejnoseměrný akustický odpor  $R_s$  [ $\text{Ns/m}^3$ ], definovaný jako odpor, který klade jednotka objemu látky průtoku vzduchu
- činitel struktury  $k$ , závislý na uspořádání kostry látky a pórů
- exponent  $n$ , který udává, zda se stlačování a zředování vzduchu při šíření zvuku pory děje izotermicky ( $n = 1$ ), adiabaticky ( $n = 1,4$ ) nebo polytropicky ( $n < 1$  až  $1,4 >$ ).

Pomocí těchto konstant lze stanovit vlastnosti porézních látek matematickou cestou za předpokladu, že látky jsou izotropní a že jsou přesně definovány a známy podmínky upevnění[1].

Čím má materiál větší tloušťku, tím vyšší má činitel pohltivosti v oblasti nízkých kmitočtů. To je způsobeno tím, že velikost pohybové energie, přeměněné v teplo je závislá na amplitudě akustické rychlosti. Porézní látka nacházející se bezprostředně u pevné stěny je málo účinná, protože akustická rychlost má na stěně uzel. Proto se v praxi z důvodů ekonomických používá často uspořádání, znázorněné schematicky na obr. 4[1].



Obr. 4: Kmitočtová závislost činitele pohltivosti měkké porézní desky umístěné před pevnou stěnou ve vzdálenosti  $d$ [1]

Jako základního materiálu pro porézní látky se užívá různých organických i anorganických hmot. Velmi rozšířeným porézním materiálem jsou netkané textilie nebo dřevovláknitá surovina, z níž jsou pak zhotovovány desky tvrdé nebo měkké[3], minerální vlna je nejvíce užívaná ve stavebnictví.

## 2.4 Rezonančně pohltivé soustavy

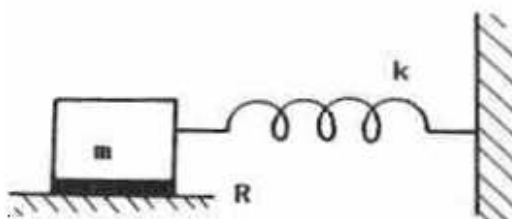
Každý rezonátor přeměňuje jistou část zvukové energie v energii jinou, a to nejčastěji tepelnou. Má-li však rezonanční soustava sloužit k účinnému pohlcování zvuku, musí být dostatečně tlumena, aby bylo co největší množství zvukové energie nashromážděné v rezonátoru přeměněno v teplo.

Uvažujme akustickou soustavu na jejím určitém rezonančním kmitočtu. Dopadne-li na ni zvukové vlnění, uvede ji do vynuceného kmitání, přičemž amplituda kmitů bude maximální pro kmitočet rezonanční. Přestane-li dopadat vlnění na soustavu, bude ještě po jistou dobu dokmitávat na vlastním (rezonančním) kmitočtu, pokud není tlumena.

Závislost činitele pohltivosti na kmitočtu vykazuje u rezonančních soustav vždy maximum na vlastním kmitočtu soustavy, neboť množství zvukové energie přeměněné na energii jinou stoupá s velikostí amplitudy některé z akustických veličin (většinou akustické rychlosti) a ty mají při rezonanci svoje maximum[1].

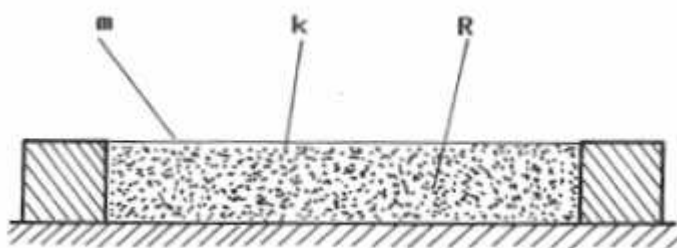
### 2.4.1 Kmitající membrány

Pod pojmem kmitající membrána rozumíme tenkou desku nebo fólii, jejíž tuhost v ohybu je velmi nepatrná a která je upevněna na rámu v určité vzdálenosti od pevné stěny, jak je znázorněno na obr. 6. Chování takové membrány můžeme přirovnat ke kmitající soustavě, která má schéma na obr. 5.



Obr. 5: Schématické znázornění kmitající akustické soustavy[1]

Membrána představuje hmotnost  $m$ . Vzduchový polštář vytváří pružinu, jejíž tuhost je  $k$  [N/m]. Prostor mezi membránou a zadní pevnou stěnou bývá vyplněn porézním materiálem, který tlumí kmitání částic vzduchu v tomto prostoru a tím i celou soustavu. Obvykle volíme membránu z takové látky, aby její ohybová tuhost byla ve srovnání s tuhostí vzduchového polštáře mnohem menší. Proto se vliv upevnění membrány na okraji prakticky neprojeví a membrána se bude pohybovat jako celek podobně jako kmitající píšť[3].



Obr. 6: Schéma uspořádání kmitající membrány[1]

Rezonanční kmitočet soustavy stanovíme ze vztahu

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1,4 \cdot p_b}{m'' \cdot d}}$$

kde je  $p_b$  [Pa] barometrický tlak vzduchu,  
 $m''$  [kg/m<sup>2</sup>] plošná hmotnost membrány,  
 $d$  [m] tloušťka vzduchového polštáře.

Dosadíme-li za barometrický tlak hodnotu 10<sup>5</sup> Pa, tak se vztah zjednoduší na tvar

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m'' \cdot d}}$$

Při rezonančním kmitočtu dochází k maximálnímu pohlcování akustické energie[3].

Jedním z dalších příkladů kmitající membrány může být napnutí tenké homogenní elastické folie s konstantní plošnou hmotností  $m''$  na tuhý kruhový rám. Tímto napnutím, vyvolaným radiálně působící silou, membrána získává svojí tuhost. Tato napínací síla vztažená na jednotku délky obvodu rámu  $v$  [N/m] je ve všech směrech konstantní a rovna vztahu

$$v = \frac{F_r}{2\pi r}$$

kde je  $F_r$  [N] celková napínací síla

$r$  [m] poloměr membrány

Pro rychlost příčné vlny  $c_m$  [m/s] šířící se na membráně vlivem působícího zvuku platí vztah

$$c_m = \frac{v}{m''}$$

kde je  $v$  [N/m] radiální napínací síla

$m''$  [kg/m<sup>2</sup>] plošná hmotnost homogenní elastické membrány

Pro vlnové číslo  $k_m$  [m<sup>-1</sup>] pak platí vztah

$$k_m = \frac{\omega}{c_m}$$

kde je  $\omega$  [m<sup>-1</sup>] úhlová rychlost kmitů

$c_m$  [m/s] rychlost příčné vlny šířící se membránou

Pokud platí předpoklad osově symetrických kmitů, lze z následujícího vztahu s pomocí koeficientů  $a_i$  uvedených v tabulce 1 stanovit vlastní frekvenci membrány.

$$\omega_i = \frac{a_i \cdot c_M}{r}$$

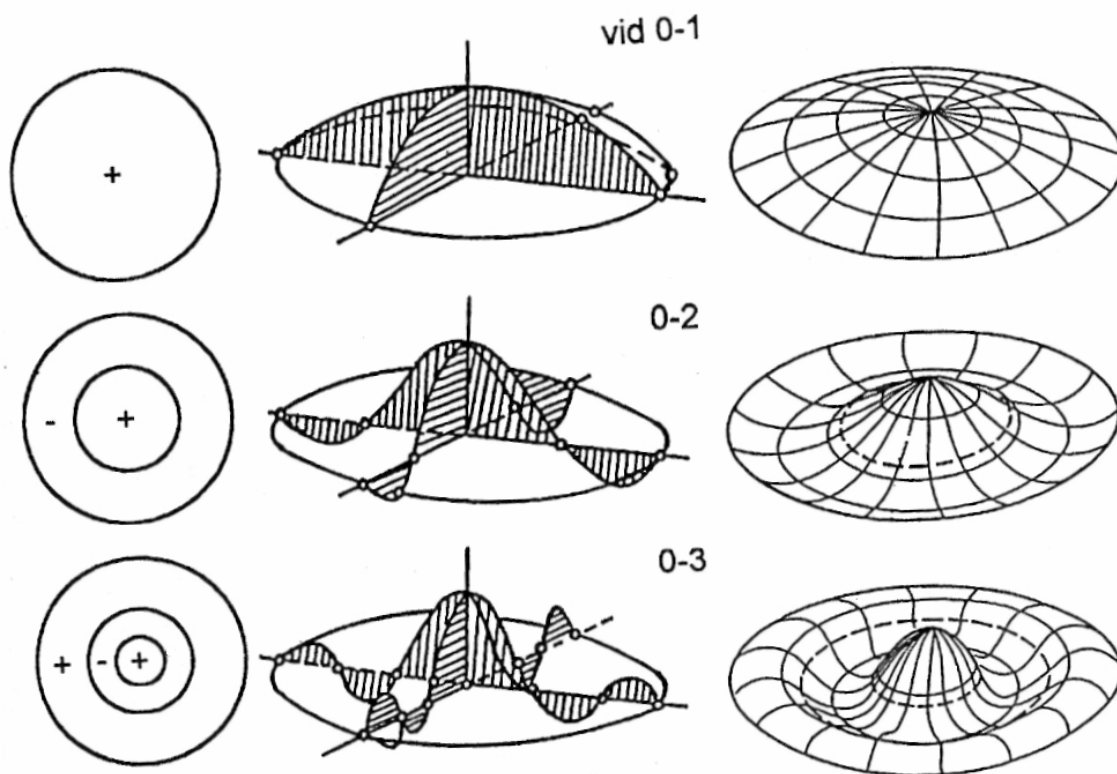
kde je  $c_m$  [m/s] rychlost příčné vlny šířící se membránou

$r$  [m] poloměr membrány

Tab. 1: Hodnoty  $a_i$  symetrických volných kmitů tenké kruhové membrány

i	1	2	3	4
$a_i$	2,4048	5,5201	8,6537	11,7915

Na obr. 7 je znázorněno rozložení výchylek prvních tří symetrických vidů kmitání kruhové membrány. Jsou zde v řezech naznačeny průhybové čáry při jednotlivých videch, dále jsou zde nakresleny uzlové čáry, označeny polarity výchylek a znázorněny tvary ploch[39].



Obr. 7 Výchytky prvních tří symetrických vidů kruhové membrány[39]

## 2.4.2 Kmitající desky

Kmitající desky se od membrán liší především svou tloušťkou a tuhostí v ohybu, která obvykle tuhost vzduchového polštáře značně převyšuje. Ve srovnání s membránami se u desek kromě základních kmitů uplatňují i kmity vyšších řádů. Vlastní kmitočty obdélníkové desky o rozměrech  $a$  a  $b$ , plošné hmotnosti  $m''$ , ohybové tuhosti  $B$ , která je volně upevněna na svém okraji (nikoliv vetknuta) ve vzdálenosti  $d$  od stěny, jsou dány výrazem

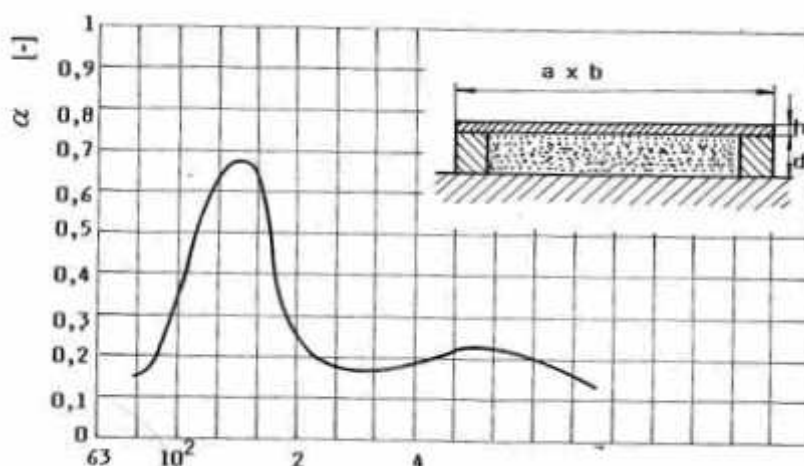
$$f_{pq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1,4 \cdot p_b}{m'' \cdot d} + \frac{4\pi \cdot B}{m''} \cdot \left[ \left( \frac{p}{a} \right)^2 + \left( \frac{q}{b} \right)^2 \right]}$$

kde jsou  $p$  a  $q$  konstanty (0,1,2...), které udávají řád vlastních kmitů.

Potřebné tlumení kmitajících desek se dosáhne obvykle vyplněním dutiny mezi deskou a stěnou vhodným porézním materiálem. Typický průběh pohltivosti v závislosti



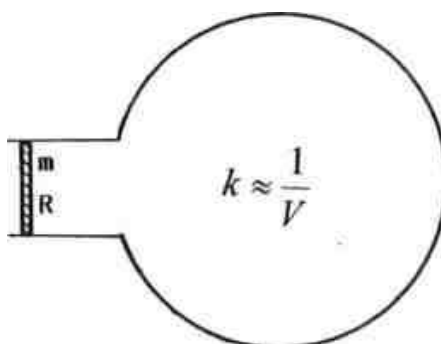
na kmitočtu je znázorněn v diagramu na obr. 8. Z obrázku je patrné, že maximum pohlcování je v oblasti nízkých kmitočtů[1].



Obr. 8: Praktický průběh činitele pohltivosti kmitající desky[1]

### 2.4.3 Helmholtzův rezonátor

Dalším typem rezonančních soustav, používaných k pohlcování zvuku, jsou konstrukce založené na principu Helmholtzova rezonátoru. Helmholtzův rezonátor znázorněný na obr. 9 je tvořen dutinou o určitém objemu  $V_H$ , opatřenou hrdlem, v níž se nachází určitá hmota vzduchu. Objem rezonátoru se chová jako poddajnost, píst reprezentuje akustickou hmotnost. Pohybu pístu (akustické hmotě) je kladen určitý odpor třením, který je reprezentován třecím odporem  $R$ .



Obr. 9: Schéma Helmholtzova rezonátoru[1]

Rezonanční kmitočet tohoto rezonátoru je dán výrazem

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S_H}{V_H \cdot l'}}$$

kde je $S_H$ [m <sup>2</sup> ]	průřez hrdla rezonátoru
$V_H$ [m <sup>3</sup> ]	objem rezonátoru
$l'$ [m]	korigovaná délka hrdla rezonátoru zahrnující do výpočtu nejbližší částice prostředí před hrdlem a za hrdlem.

Jednotlivě rozmístěné rezonátory v prostoru se používají v praxi velmi zřídka a to pro pohlcování nejnižších zvukových kmitočtů v případech, kdy z nějakého důvodu nelze použít kmitající membrány nebo desky[1].

## 2.5 Výroba NT

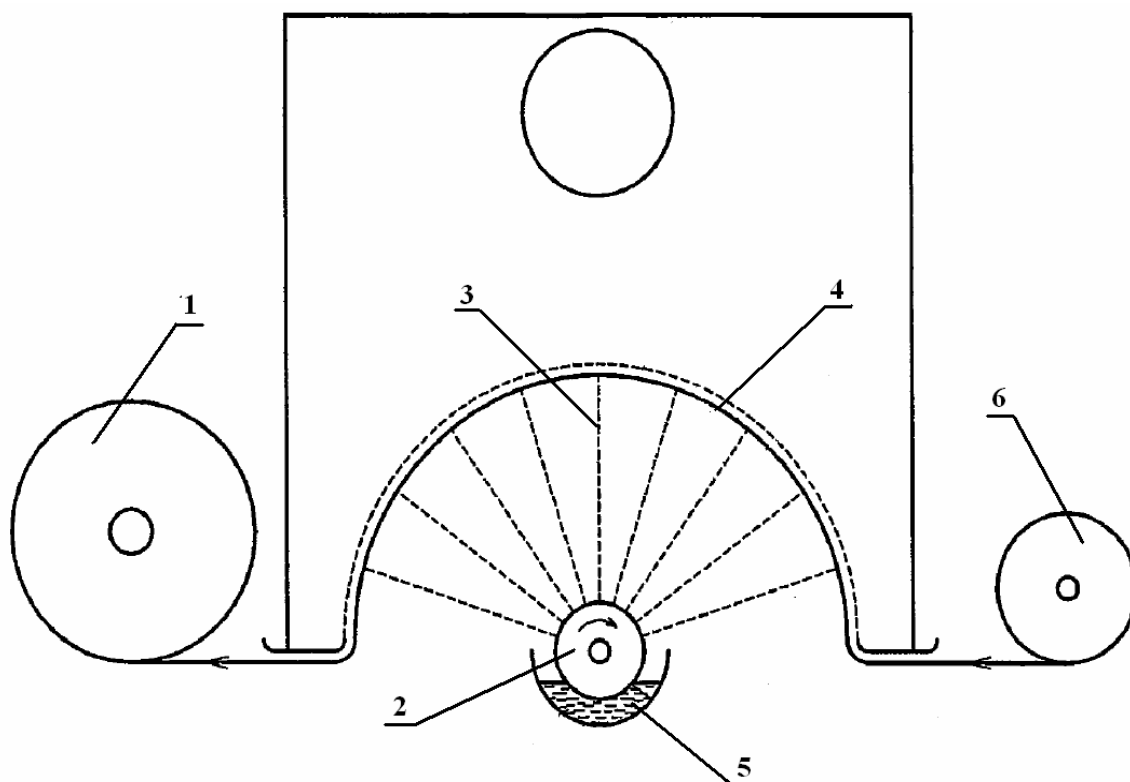
V této části diplomové práce bude uveden stručný popis některých metod výroby netkaných textilií, které úzce souvisejí s prováděným experimentem.

### 2.5.1 Elektrostatické zvlákňování

Prvotní tvorba vláken v procesu elektrostatického zvlákňování byla založena na formování taveniny polymeru ve vlákna působením silného elektrostatického pole. Vzniklá vlákna byla současně vlivem pole ukládána na podložku pohybující se po povrchu protielektrody[7]. Vynález procesu elektrostatického zvlákňování si v roce 1934 patentoval Formhals jako proces výroby syntetických vláken pomocí elektrického pole. Zvlákňoval acetátová vlákna s použitím acetonu jako rozpouštědla. V šedesátých letech prezentoval sir Goefry Taylor základní studii zabývající se vlivem elektrického pole na tvorbu vláken v procesu elektrostatického zvlákňování[9]. Následuje řada výzkumů a patentů. Například v sedmdesátých letech byl patentován drátkový stroj a v roce 2004 zařízení zvané Nanospider.

### 2.5.1.1 Princip elektrostatického zvlákňování

V procesu elektrostatického zvlákňování je využito vysoké napětí k vytvoření elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny (obr. 10). Elektroda vysokého napětí je spojena přímo s polymerním roztokem. Roztok je následně zvlákňován z povrchu protielektrody (válečku). Díky vysokému elektrickému napětí mezi povrchem válečku a uzemněným kolektorem vznikají na povrchu válečku tzv. Taylorovy kužely, z kterých jsou produkována submikronová vlákna. Vlákna ztuhnou po odpaření rozpouštědla a vytvoří vlákennou vrstvu na povrchu kolektoru. Nabitý proud se zrychluje a ztenčuje v elektrickém poli, nakonec narazí na uzemněnou protielektrodu kolektoru, na které se usadí[4,35].



Obr. 10: Schéma principu elektrostatického zvlákňování[35]:

1 – odtah vlákenné vrstvy, 2 – zvlákňovací váleček, 3 – proud polymerního roztoku, 4 – uzemněný kolektor (protielektroda), 5 – roztok polymeru, 6 – přívod podkladového materiálu

### 2.5.1.2 *Princip tvorby vlákna*

V důsledku elektrického pole mezi válečkem a kolektorem je na povrchu kapaliny indukován elektrický náboj. Vzájemná odpudivost nábojů a stažení povrchových nábojů k opačné elektrodě způsobí sílu přímo opačnou povrchovému napětí. Jak intenzita elektrického pole vzrůstá, hemisférický povrch kapaliny na povrchu válečku se prodlužuje, až tvoří Taylorův kužel. Dalším zvýšením elektrického pole je dosaženo kritické hodnoty, po které odpudivá elektrostatická síla překoná povrchové napětí a ze špičky Taylorova kuželu je vypuzen nabitý proud kapaliny. Vytékající proud polymerního roztoku podstoupí nestability a proces prodlužování, což způsobí, že se proud stane velmi dlouhým a tenkým. Mezitím se odpaří rozpouštědlo a zanechá po sobě nabitě polymerní vlákno. V případě taveniny vytékající proud ztuhne na své dráze vzduchem od zvlákňovacího válečku ke kolektoru[4].

### 2.5.2 Polyvinylalkohol

Polyvinylalkohol se vyrábí hydrolýzou polyvinylacetátu, z tohoto důvodu vždy obsahuje jisté množství polyvinylacetátových skupin, které ho modifikují a jsou příčinou jeho dosti proměnlivých vlastností. Odolnost polyvinylalkoholu vůči rozpouštědlům závisí na obsahu nehydrolyzovaného polyvinylacetátu, na střední molekulové hmotnosti a na teplotě. Polymer s více než pětiprocentním obsahem vinylacetátových jednotek se již rozpouští ve vodě jen při teplotách nad 65 °C. Čím vyšší je jeho molekulová hmotnost, tím menší je jeho rozpustnost. V olejích se nerozpouští ani za tepla, v jednosytných alkoholech botná, ve vícesytných se rozpouští. Odolává organickým kyselinám. Je málo termoplastický. Lze jej použít za teplot od -50 °C do 130 °C, nad 200 °C se rozkládá [8].

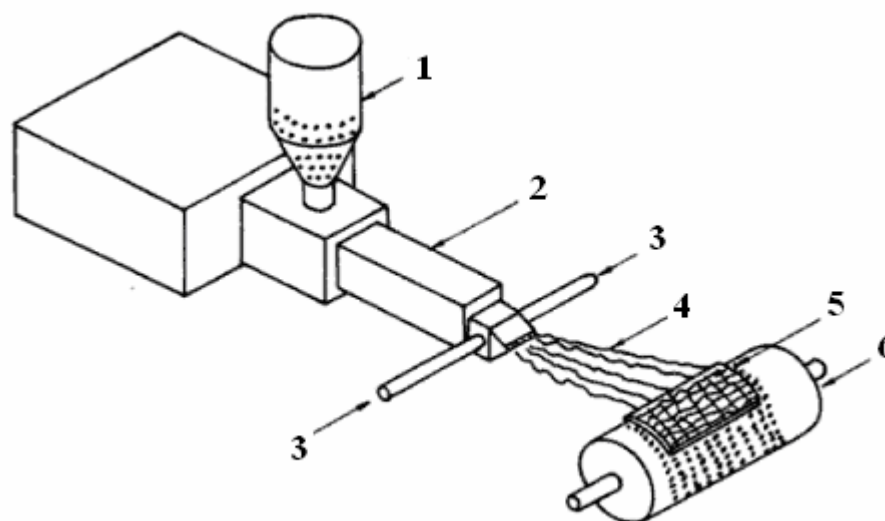
### 2.5.3 Technologie Meltblown

Meltblown je proces výroby vláken z taveniny polymeru s použitím proudu horkého vzduchu. Technologie byla vyvinuta v USA počátkem 50. let[12].

#### 2.5.3.1 *Princip*

Jde o proces, při kterém stlačený horký vzduch proudící vysokou rychlostí, odtahuje taveninu polymeru z trysek, čímž vytváří velmi jemná vlákna. Tato vlákna

jsou unášena proudem vzduchu a následně zachycena na sběrném zařízení, kde vytváří vláknennou vrstvu. Schématicky je proces znázorněn na obr. 11[5].



*Obr. 11: Schéma procesu Meltblown:*

*1 – násypka, 2 – extrudér, 3 – horký vzduch, 4 – vlákna, 5 – vláknenná vrstva, 6 – sběrný buben[10]*

#### 2.5.3.2 Výroba vláknenné vrstvy

Polymer je vlivem tlaku vytlačen z otvorů zvláknovacích trysek a okamžitě unášen proudem horkého vzduchu, čímž se vytváří vlákna. Ta jsou dále unášena směrem ke kolektoru. Vlivem okolního vzduchu dochází k jejich dloužení, ochlazení a zpevnění. Při dopadu na kolektor vytvářejí vláknennou vrstvu[11]. Vlákna jsou ve výsledné vrstvě, díky pohybu v proudu vzduchu, téměř výhradně umístěna nahodile. Potřebná nízká viskozita taveniny omezuje výběr vhodného polymeru výhradně na PP (90%) s indexem toku v rozmezí 800 až 1500g/10min[12].

Modifikace tohoto procesu mohou spočívat ve změnách nastavení parametrů procesu meltblown, čímž dojde ke změně vlastností vláknenné vrstvy. Jde například o změnu parametru procesu v průběhu jeho činnosti. Tyto změny zahrnují teplotu vzduchu, trysek, tavení, vzdálenost tryska kolektor, rychlost kolektoru a dávkování polymeru a vzduchu. Dávkování polymeru a vzduchu ovlivňuje výsledný průměr

vláken. V případě offline změn se jedná o změny prováděné výhradně v případě, kdy zařízení není v provozu. Jde například o průměr trysek. Materiálové změny zahrnují typ polymeru, molekulovou hmotnost polymeru, distribuci molekulové hmotnosti polymeru, viskozitu taveniny polymeru, přísady polymeru a velikost granulí. Vlastnosti polymeru a procesu a jejich vliv na výslednou vlákennou vrstvu jsou uvedeny v tab. 2.

*Tab. 2: Vlastnosti polymeru a parametry procesu ovlivňující vlastnosti výsledné vlákenné vrstvy[10]*

Parametr	Vlastnosti vlákenné vrstvy
<i>Index toku polymeru</i>	průměr vláken
<i>Teplota vzduch</i>	průměr vláken zapleteniny
<i>Teplota polymeru</i>	průměr vláken
<i>Molekulová hmotnost</i>	orientace molekul
<i>Úhel proudu vzduchu</i>	stejnomořnost jemnost vláken distribuce zaplétání vláken
<i>Rychlost proudu vzduchu</i>	průměr vláken délka vláken Objem propustnost
<i>Rychlost chlazení</i>	pevnost měkkost
<i>Rychlost kolektoru</i>	plošná hmotnost
<i>Typ polymeru</i>	pružnost měkkost navlhavost schopnost barvení odolnost vůči chemikáliím

### 2.5.3.3 Vlastnosti a parametry vlákenné vrstvy

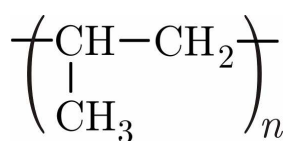
Mezi hlavní charakteristické rysy vláken meltblown patří

- nahodilá orientace vláken ve vrstvě
- nižší tažnost a pevnost
- průměr vláken od 0,5 do 30  $\mu\text{m}$  (obvykle od 2 do 7  $\mu\text{m}$ )
- plošná hmotnost od 8 do 350  $\text{g/m}^2$  (obvykle 20 až 200  $\text{g/m}^2$ )
- vysoký měrný povrch (dobré filtrační a izolační vlastnosti)
- vlákna mají obvykle hladký povrch a kruhový průřez

Délka vláken MB je proměnná a obvykle existuje ve velkém rozsahu. Stejně tak je proměnný i tvar průřezu vláken od kruhového po různě tvarovaný průřez trysky[5].

### 2.5.4 Polypropylen

Polypropylen (PP) je termoplastický polymer, používaný v mnoha odvětvích textilního průmyslu a v laboratorních vybaveních. Polypropylen má prakticky nepolární strukturu a získáváme ho za pomoci katalyzátorů polymerizací propenu. Výtěžek izotaktického polypropylenu je vždy větší než 90%, pro zvláknování se požaduje tzv. index izotakticity vyšší než 95, jelikož ataktický podíl zhoršuje mechanické vlastnosti polypropylenu. Díky stupni krystalinity dosahujícímu 60% až 75% je neprůhledný. Teplota tání čistého izotaktického polypropylenu je 176 °C, obchodní produkty v rozmezí od 160 °C do 170°C.



Obr. 12: Strukturní vzorec PP[29].

Ve srovnání s polyethylenem má vyšší teplotu měknutí, proto je použitelný při vyšších teplotách, má nižší hustotu, menší odolnost vůči mrazu, oxidaci a povětrnostním vlivům. Naopak má vyšší pevnost, tvrdost a odolnost vůči otěru a chemikáliím. Při teplotách vyšších než 80 °C se rozpouští v aromatických a chlorovaných uhlovodících.

*Tab. 3: Fyzikální vlastnosti polypropylenu*

<b>Hustota [<math>\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}</math>]</b>	900 - 910
<b>Pevnost v tahu [MPa]</b>	22 - 32
<b>Tažnost [%]</b>	120 - 700
<b>Houževnatost [<math>\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}</math>]</b>	10 až 15
<b>Navlhavost [%]</b>	0,1

Polypropylen je široce využíván k výrobě mechanicky a chemicky odolných vláken[8]. V této práci byl používán polypropylen obchodní značky Borealis.



## 3 Rešerše

### 3.1 Akustické vlastnosti NT

Práce mnoha autorů se zabývají popisem jednotlivých parametrů a vlastností netkaných textilií, které mohou ovlivňovat jejich chování z hlediska zvukové pohltivosti. Následující text je souhrnem nejdůležitějších poznatků a výsledků četných studií.

#### 3.1.1 Mechanismus absorpce zvuku vlákněným materiálem

Vlákněný materiál pohlcující zvuk přeměňuje akustickou energii v tepelnou. G. Ballou ve své knize[6] popisuje zvukovou absorpci vlákněným materiálem jako jednoduchý mechanismus, kdy zvuk díky akustickému tlaku prostoupí do vlákněného materiálu. Částičky vzduchu nesoucí zvuk kmitají v mezerách mezi vlákny v závislosti na zvukové vlně. Toto kmitání má za následek přenos energie třením molekul vzduchu o vlákna.

#### 3.1.2 Faktory ovlivňující zvukovou pohltivost NT

Četné práce uvádějí, že snížení *průměru vláken* má za následek zvýšení zvukové pohltivosti vlákněného materiálu. P. L. Lefebvre et al. ve své práci[27] porovnává vlákna o různých průměrech a uvádí, že tenká vlákna se snadněji pohybují se zvukovou vlnou. Navíc pro dosažení stejné objemové hmotnosti je zapotřebí více jemnějších vláken, což má za následek zvýšení odporu materiálu proti proudu vzduchu a prodloužení cesty průchodu částic vlákněnou vrstvou. Koizumi et al. ve svém experimentu[13] uvádí, že vlákna s jemností 1,5 – 6 denier lépe pohlcují zvuk než vlákna silnější, navíc vlákna s jemností menší než jeden denier poskytují dramatické zvýšení akustického výkonu. V jednom z experimentů práce[38] L. Youneunga a J. Changwhana se autoři zabývali vlivem jemnosti polyesterových vláken na pohlcování zvuku. Vytvořili čtyři vlákněné vrstvy, které osahovaly různý poměr vláken o jemnostech 6, 2 a 1.25 den. Velikost činitele zvukové pohltivosti rostla s vyšším obsahem jemnějších vláken.

Neméně významným parametrem vláken je jejich *měrný povrch*. Všeobecně má tření mezi vlákny a vzduchem s rostoucí plochou vláken za následek vyšší pohlcování

zvuku. Autoři N. Kino a T. Ueno ve své práci[14] posuzovali zvukovou absorpci polyesterových vláken z hlediska tvaru jejich průřezu při zachování stejné jemnosti. K dispozici měly vlákna kruhová, trojúhelníková, dutá a plochá o jemnosti 0,22 tex. Dospěli k závěru, že vlákna s trojúhelníkovým průřezem a plochá vlákna pohlcují zvuk přibližně o 20 % lépe než stejná vlákna kruhového průřezu. Z toho vyplývá, že na absorpci zvuku vlákněným materiálem má velký vliv i průřez vláken. N. Jiang ve své práci[26] poukazuje na fakt, že tření mezi vlákny a částčkami vzduchu nesoucí zvuk roste se zvyšujícím se měrným povrchem. Tedy vlákna s tvarovaným průřezem lépe absorbují než vlákna s hladkým kruhovým průřezem.

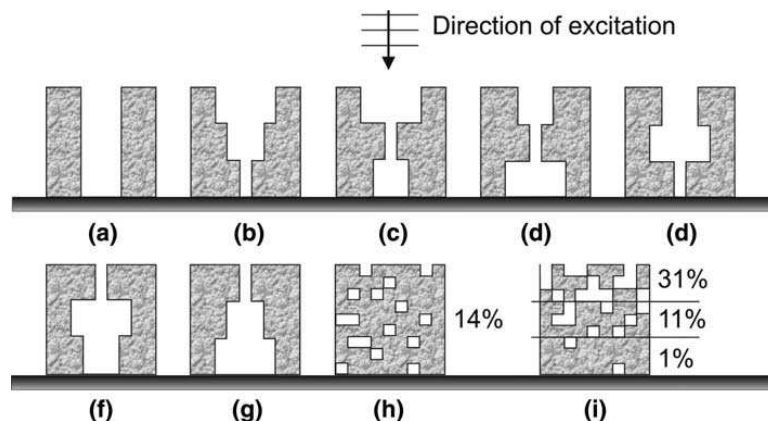
Autoři W. Grondzik, A. Kwok, B. Stein a J. Reynolds zabývající se akustickými vlastnostmi materiálů ve své knize[15] potvrzují, že pohlcování zvuku o nízkých frekvencích přímo souvisí s *tloušťkou* vlákněného materiálu. Experimentálně bylo zjištěno, že efektivně pohlcují materiály o tloušťce odpovídající přibližně jedné desetině vlnové délky zvuku. Dále pak, že vynikající zvukovou absorpci vykazují materiály o tloušťce jedné čtvrtiny vlnové délky zvuku. S rostoucí tloušťkou materiálu se zvyšuje pouze absorpce zvuku s nízkou frekvencí.

Další významnou vlastností, kterou je třeba sledovat při studiu vlákněného materiálu vhodného pro pohlcování zvuku je *porozita*[24]. Důležitými faktory pak jsou počet pórů, velikost a typ pórů. Z. Hong et al. ve své práci[16] uvádí, že aby materiál přeměnil zvukovou energii na tepelnou pomocí tření, musí se zvuková vlna dostat do vlákněné vrstvy, což znamená, že by měl materiál obsahovat velké množství pórů na povrchu, které umožní zvukové vlně prostoupit materiálem a ztlumit ji. F. C. Sgard et al. ve své práci[17] definuje porozitu jako poměr objemu vzduchu ku celkovému objemu materiálu.

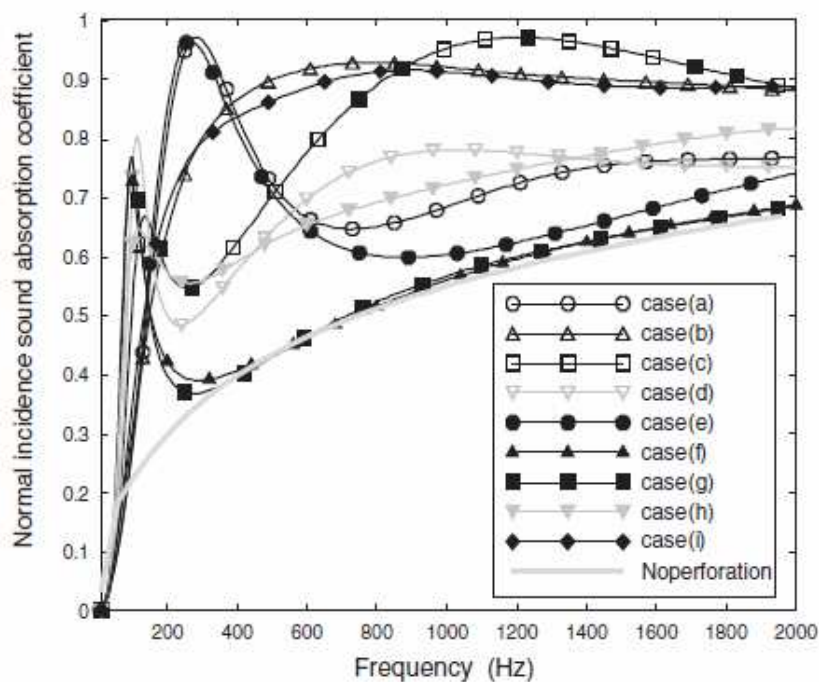
$$\sigma = \frac{V_{\text{vzduchu}}}{V_{\text{celkové}}}$$

Zabývá se různým tvarováním pórů a jejich vlivem na šíření a absorpci zvuku materiálem. Na obr. 13 a 14 jsou uvedeny tvary pórů a jejich vliv na součinitel zvukové pohltivosti materiálu. G. Ballou ve své knize[6] uvádí, že s hodnotou porozity  $\sigma = 0,125$  je možné pro nízké frekvence dosáhnout činitele zvukové pohltivosti maximálně  $\alpha = 0,4$  a pro  $\sigma = 0,25$  je  $\alpha = 0,65$ . Nakonec uvádí, že materiály s porozitou  $\sigma \geq 0,5$  budou mít

součinitel  $\alpha$  maximálně 0,9. Porozita tedy zlepšuje šíření zvukové vlny materiálem, proto je důležité zabývat se jí při výrobě vlákenné vrstvy vhodné pro akustickou pohltivost.



Obr. 13: Profily pórů [17]



Obr. 14: Činitel zvukové pohltivosti pro různě profilované póry [17]

R. Kirby a A. Cummings ve své studii [18] popisují **zakřivení** (z angl. *tortuosity*) jako veličinu, která nám udává, o kolik delší cestu musí částice nesoucí zvuk urazit při průchodu materiálem ve srovnání se samotnou tloušťkou vlákenné vrstvy. Tedy je to

poměr délky cesty částice skrz materiál ku tloušťce samotného materiálu. Jde tedy o veličinu popisující vliv vnitřní struktury materiálu na jeho akustické vlastnosti. Čím delší cestu musí částice překonat, tím více energie může materiál pomocí tření přeměnit.

Dalším významným faktorem ovlivňujícím akustické vlastnosti materiálu je **objemová hmotnost** materiálu, která přímo souvisí s cenou materiálu. Při zvyšování hustoty vlákenné vrstvy současně roste i schopnost vlákenné vrstvy pohlcovat zvuk o středních a vysokých frekvencích[19]. S rostoucí hustotou se tedy zvyšuje počet vláken na jednotku plochy. Tím se tedy zvyšuje energetická ztráta třením částic vzduchu a povrchu a tedy i součinitel zvukové pohltivosti[25]. Experimentálně bylo zjištěno, že méně hustá a více otevřená struktura pohlcuje nižší frekvence (500 Hz). Hustší struktura lépe pohltí frekvence nad 2000 Hz[22].

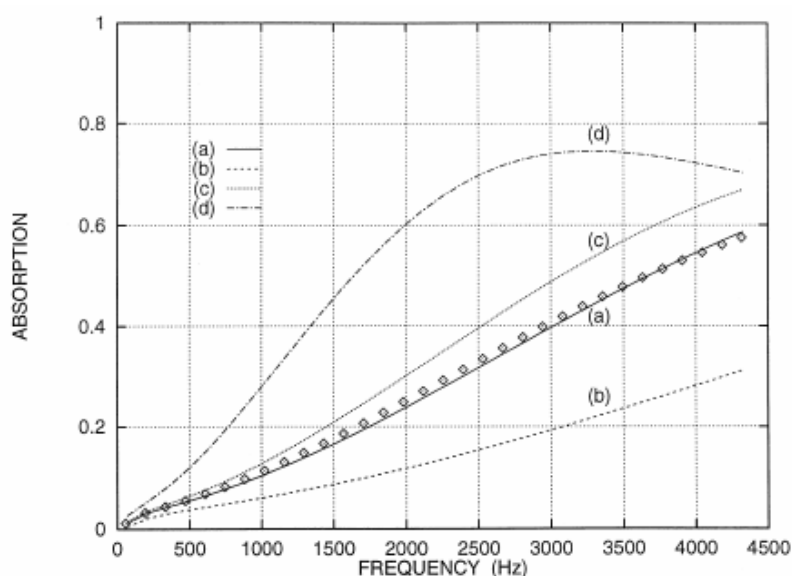
Specifický **odpor proti proudu vzduchu** vztažený na jednotku tloušťky je jedna z nejdůležitějších vlastností materiálů určených ke zvukové absorpci. Míra pohlcování zvuku a přeměny energie je ve velké míře závislá na schopnosti materiálu propustit zvukovou vlnu a dovolit částčkám vzduchu nesoucím zvuk prostoupit do materiálu[20]. Obecně se při vstupu zvuku do materiálu sníží amplituda kmitání částic přenášejících zvuk vlivem tření, jelikož se zvuková vlna musí pohybovat zakřiveným prostorem, dochází k přeměně akustické energie na tepelnou. Množství tření je charakterizováno právě odporem materiálu vůči proudu vzduchu[19]. Definujeme ho rovnicí

$$R = \frac{\Delta p}{V \cdot L} \quad Pa \cdot s \cdot m^{-2}$$

kde	R	je specifický odpor vzduchu
	V	je rychlost průchodu částice vrstvou [m/s]
	$\Delta p$	je rozdíl akustického tlaku před a za vrstvou měřený ve směru proudu vzduchu [N/m <sup>2</sup> ]
	L	je tloušťka [m]

Vyšší hustota vlákenné vrstvy snižuje propustnost vzduchu, následkem toho roste odpor proudu vzduchu[19].

Vlivem **komprese** dochází ke snížení tloušťky materiálu a tím i ke snížení schopnosti vlákně vrstvy absorbovat zvuk. Vliv komprese je důležitý v automobilovém průmyslu, kdy dochází ke stlačení vlivem působení pasažérů a jejich váhy. B. Castagnede et al. [21] uvádí, že se vlákna vlivem komprese k sobě přiblíží, aniž by došlo k deformaci jejich velikosti a průřezu. Dochází pouze ke snížení tloušťky vlákně vrstvy. Dále ve své studii poukazuje na fakt, že vlivem komprese vlákně vrstvy dochází ke zvýšení tortuosity, odporu materiálu vůči proudu vzduchu a ke snížení porozity. Navzdory těmto dalším faktorům uvádí, že hlavní podíl na snížení zvukové pohltivosti vlivem komprese má snížení tloušťky. Následující graf (obr. 15) zobrazuje vliv stlačení materiálu na součinitel zvukové pohltivosti. Materiál o stejné počáteční tloušťce byl stlačen jinou silou, poměr tloušťky materiálu před a po stlačení je vyjádřen stupněm stlačení  $n_s = \frac{h_0}{h}$ .



Obr. 15: Vliv komprese na součinitel zvukové pohltivosti

(a)  $n=17/15=1.133$  (b)  $n=17/8.5=2$ , (c)  $n=17/18=0.944$  (d)  $n=17/34=0.5$ .

**Další faktory** ovlivňující zvukovou pohltivost materiálů přímo souvisí s místem použití. Zvukově pohltivé materiály bývají obvykle používány ve vnitřních prostorech, proto jsou na ně kromě pohlcování zvuku kladeny i jiné požadavky. Například je to dobrá stálost na světle, vhodná barva, požadovaný vzhled, dobrá udržitelnost, ohnivzdornost a trvanlivost. Často je na materiál nanášena barva, proto je důležité sledovat vliv nánosu barvy na pohltivost materiálu. Dle práce[23] K. Mulhollanda má

povrchová úprava největší vliv na materiály s více otevřeným povrchem. Zde je nutné aplikovat co nejtenčí vrstvu barvy, například použitím stříkací pistole.

Vzhledem ke všem faktorům, vyjmenovaným v této kapitole, má hlavní vliv na zvukovou pohltivost materiálu pohlcovaná frekvence. Absorpce se obecně zvyšuje s rostoucí frekvencí. Proto je důležité materiály vyrábět s ohledem na druh jejich aplikace a rozsah pásma, kterému budou vystaveny. Například v automobilovém průmyslu jsou užívány tenčí materiály pro pohlcování vyšších frekvencí. Silnější materiály užívané ve dřevních výplních pro nižší frekvence. Z těchto důvodů je důležité znát rozsah frekvence, kterou chceme pohltit, abychom vyrobili vhodný materiál. Z toho tedy plyne, že různé materiály různě pohlcují. Obecně lze říci, že porézní materiály, jako netkané textilie a pěny, dobře pohlcují vyšší frekvence. Pro zvýšení pohltivosti nižších frekvencí můžeme zvýšit tloušťku, která nám poskytne vyšší plochu pro absorpci[33].

### **3.1.3 Aplikace zvukově pohltivých materiálů**

Zvukově pohltivé materiály mají mnoho různých zastoupení jako zajišťovat správné akustické vlastnosti místností, odhlučnění průmyslových provozů, stavební a studiová akustika, dopravní průmysl. Zvukově pohltivé materiály jsou obecně využívány k potlačení nežádoucích účinků při odrazu zvuku od nepohltivých materiálů jako pevných a tvrdých stěn a tím pomáhají redukovat odražené hladiny hluku. Jsou využívány jako vnitřní obložení stěn, vozidel, bytů a letadel. Dále pak jako izolanty nebo akustické řešení místností určených pro koncerty a hudební vystoupení, čímž mohou ovlivnit sluchový vjem posluchače a zvýšit například srozumitelnost řečníků a hudebního zvuku. Při řešení akustických problémů vždy vycházíme ze spektra zvuku vydávaného zdrojem. Proto je zvolený materiál vždy vybírán s ohledem na zdroj zvuku a prostor[32, 33].

## 4 Experimentální část

### 4.1 Cíl

Podstatou experimentální části této práce bylo vyrobit vlákennou vrstvu technologií meltblown a technologií elektrostatického zvlákňování z válečku. Měnit její parametry, jako plošnou hmotnost a podíl vláken MB a nanovláken ve výsledné vrstvě, a potvrdit předpoklad vlivu nanovláken na zvukovou absorpci vlákenné vrstvy.

### 4.2 Úkoly

- 1) vyrobit vlákennou vrstvu ze směsi nanovláken a vláken typu meltblown s rozdílnou plošnou hmotností a stejným podílem nanovláken
- 2) vyrobit vlákennou vrstvu pouze technologií meltblown odpovídající plošným hmotnostem z úkolu 1.
- 3) vyrobit vlákennou vrstvu ze směsi nanovláken a vláken typu meltblown s rozdílnou koncentrací meltblown a nanovláken a stejnou plošnou hmotností
- 4) vyrobit vlákennou vrstvu pouze technologií meltblown odpovídající parametrům vlákenné vrstvy z úkolu 3.
- 5) zhotovit vzorečky pro měření pomocí dvoumikrofonové impedanční trubice
- 6) proměřit vzorky umístěné na nosném materiálu v dvoumikrofonové impedanční trubici
- 7) proměřit samostatné nosné materiály v dvoumikrofonové impedanční trubici

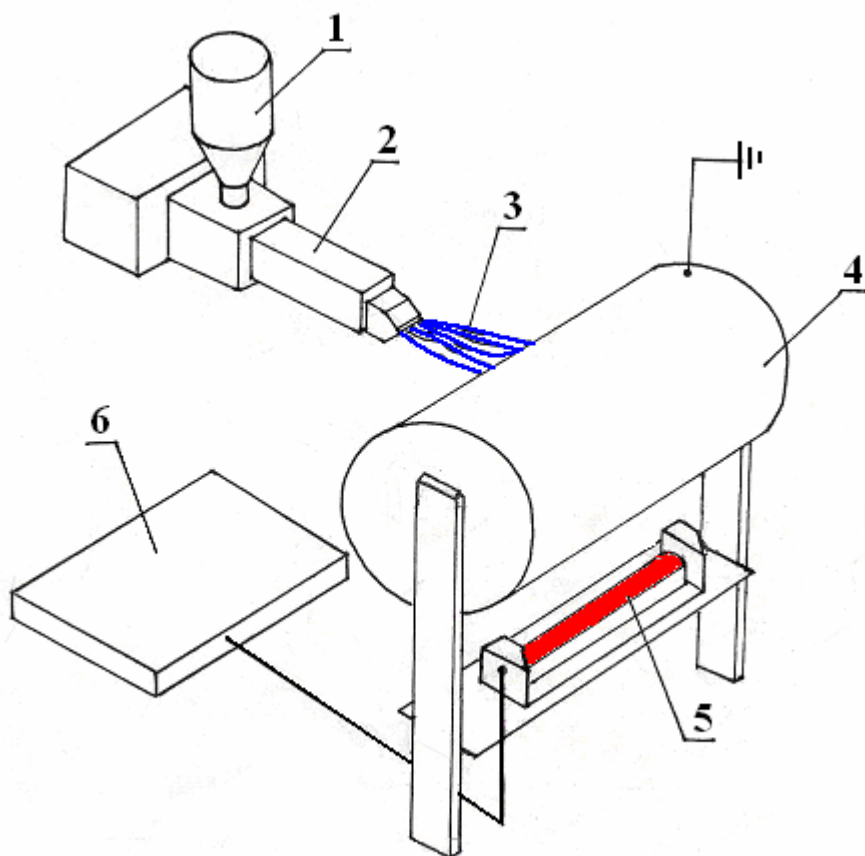
### 4.3 Použité zařízení

#### 4.3.1 Prototyp zařízení kombinující proces výroby vláken technologií MB a elektrostatického zvlákňování z válečku

Výroba vlákenné vrstvy ze směsi nanovláken a vláken typu meltblown byla prováděna na prototypu zařízení pro výrobu vláken kombinující technologii MB a elektrostatické zvlákňování z válečku (obr. 16) umístěném v poloprovozu katedry



netkaných textilií. Přístroj se skládal ze samostatné jednotky meltblown a zařízení pro výrobu nanovláken. Proces výroby všech vlákenných vrstev na tomto zařízení sestával z několika kroků. Nejprve bylo spuštěno zařízení meltblown, polymerní granulát byl umístěn do násypky. Následovalo nastavení potřebných parametrů tohoto procesu výroby vláken (teploty jednotlivých zón, teplota vzduchu, tlak atd.). Dále byl nalit polymerní roztok na otáčející se zvlákňovací váleček a zapnuto otáčení kolektoru. Na kolektoru byl předem upevněn podkladový materiál v podobě textilie spunbond pro lepší snímání výsledné vlákenné vrstvy. Nakonec byl spuštěn proces elektrostatického zvlákňování zapnutím zdroje vysokého napětí.



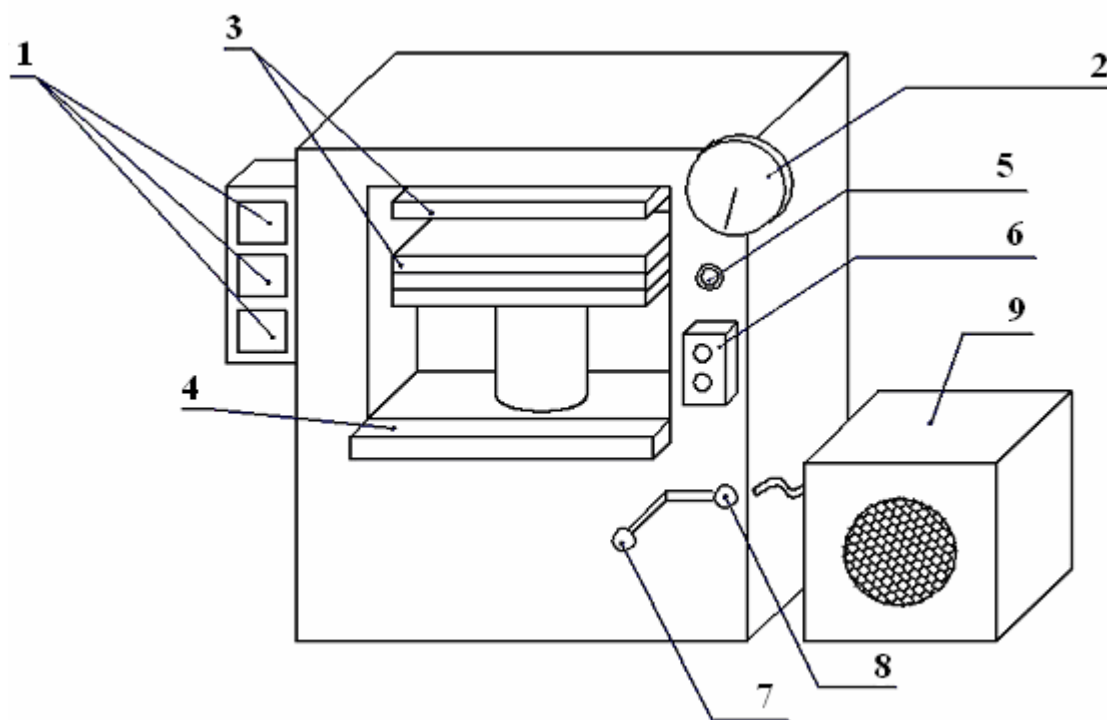
Obr. 16: Schéma laboratorního zařízení:

1 - násypka, 2 - extrudér, 3 – vlákna MB, 4 - kolektor, 5 – zvlákňovací váleček, 6 – zdroj vysokého napětí



### 4.3.2 Etážový lis

Laboratorní etážový lis (obr.17) sloužil k vysekávání vzorků v podobě soustředných kruhů o průměru 29 mm pomocí kovové raznice. Vzorek byl vložen mezi raznici a plastovou desku. Následně byl umístěn na pracovní desku mezi přítlačné čelisti a působením lisovací síly došlo k vyseknutí vzorku o požadovaném tvaru. Výroba všech vzorků probíhala tímto způsobem na laboratorním etážovém lisu umístěném v poloprovozu katedry netkaných textilií.

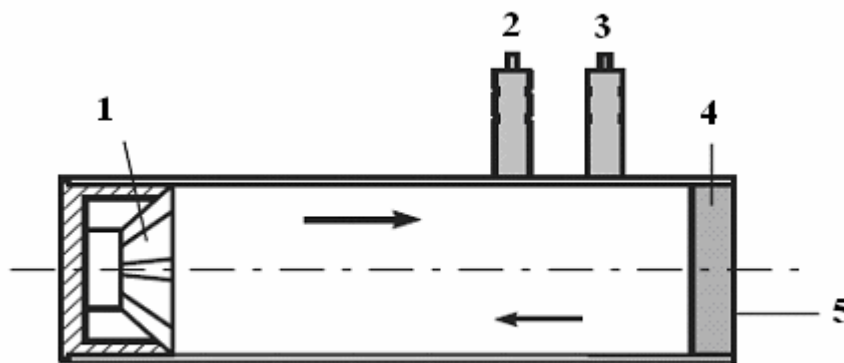


Obr. 17: Schéma laboratorního etážového lisu[37]:

1 - nastavení teploty, 2 - měření tlaku (tlakoměr), 3 - přítlačné čelisti, 4 - pracovní deska, 5 – kontrolka, 6 - spouštění a vypínání motoru (poloha 1, poloha 2), 7 - páka pro uvolnění přítlačných desek, 8 - páka pro rychlejší chod vzhůru, 9 - motor

### 4.3.3 Dvou-mikrofonová impedanční trubice Brüel and Kjær

Zdroj zvuku (reproduktor) je umístěn na jednom konci impedanční trubice a testovaný vzorek materiálu je umístěn na straně druhé, tak jak je to zobrazeno na obr. 18.



Obr. 18: Dvouvibrofonová impedanční trubice[28]:

1 – zdroj zvuku, 2 – mikrofon 1, 3 – mikrofon 2, 4 – testovaný vzorek, 5 – opěrná deska

Reproduktor vytváří širokopásmové náhodné zvukové vlny, které se jako rovinná vlna šíří v prostoru trubky, dopadají na materiál a následně se od vzorku materiálu odráží. Dvojice mikrofonů umístěných ve stěně trubice měří akustický tlak dopadající a odražený. Výpočtem složené přenosové funkce s použitím dvoukanálového frekvenčního analyzátoru je možné určit činitel zvukové pohltivosti, komplexní koeficient odrazivosti a akustickou impedanci zkoumaného materiálu. Použitelný rozsah frekvencí závisí na průměru trubky a vzdálenosti mezi mikrofony. Tato metoda se řídí normou ISO 10534-2.

### Impedanční trubice Kit (50Hz - 6.4 kHz) Typ 4206

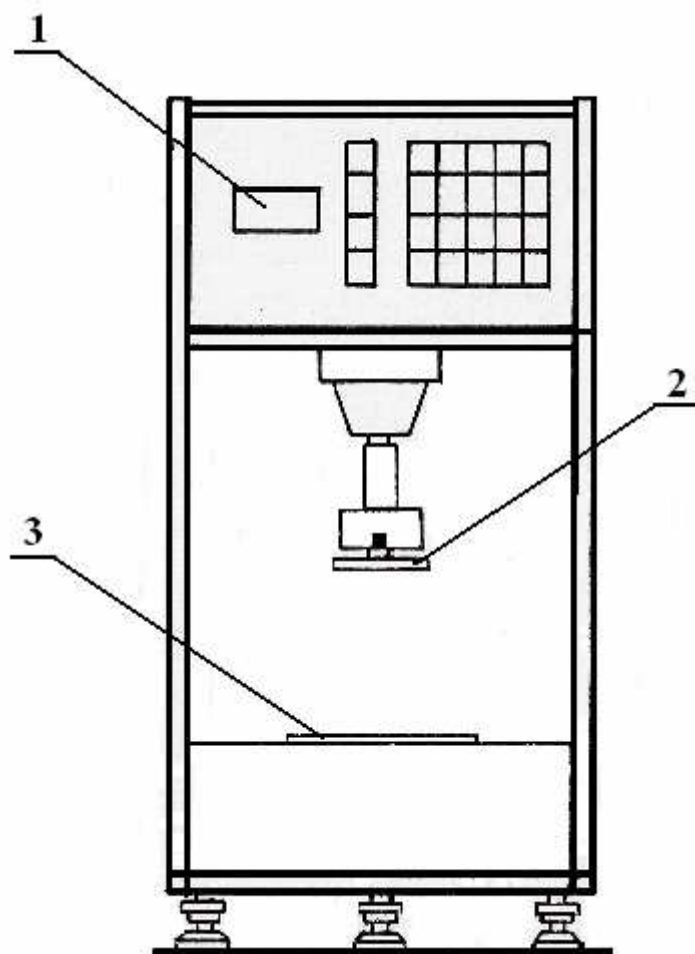
Typ 4206 se skládá z:

- velké trubice (průměr 100 mm)
- malé trubice (průměr 29 mm)
- držáku vzorků (29 a 100 mm)

Při měření menších vzorků je trubka se vzorkem o průměru 29 mm uchycena do otevřeného konce velké trubky s reproduktorem[28].

#### 4.3.4 Tloušťkoměr

Přístroj (obr. 19) sestává z tlakového mechanismu a elektroniky. Měřený vzorek byl umístěn na nosnou destičku o průměru 100 mm. Při zapnutí přístroje došlo k přiblížení přitlačné hlavy rychlostí 1 mm/sec a zvoleném tlaku 0,1 kPa. Přitlačná hlava vytvářela specifický tlak po dobu 30 sekund a následně se na displeji zobrazila naměřená tloušťka s přesností 0,01 mm. Takto bylo postupováno při měření všech vzorků. Měření tloušťky se řídilo normou ISO 9073-2 a probíhalo na tloušťkoměru typu FF-77 umístěného na katedře textilních materiálů.



Obr. 19: tloušťkoměr typ FF – 77[36]:

1 – displej, 2 – přitlačná deska, 3 – nosná destička

#### 4.3.5 Rastrovací elektronový mikroskop

Rastrovací elektronový mikroskop AQUASEM (obr. 20) umístěný na katedře textilních materiálů sloužil k zobrazení struktury vyrobených vlákenných vrstev a jejich obrazové analýze. Všechny vzorky byly zobrazovány v podobě řezu. Vhodný vzorek byl vytvořen pomocí žiletky a zařízení pro uchycení vlákenné vrstvy. Následně byl vzorek uchycen pomocí kovového plíšku na terčík a vložen do zařízení pro naprašování vodivou vrstvou kovu. Nakonec byl vzorek vložen do preparátové komory a pomocí softwaru byly vytvořeny snímky.



*Obr. 20: Rastrovací elektronový mikroskop VEGA-TESCAN[34]*

#### 4.3.6 Analytické váhy

Pro stanovení plošné hmotnosti jednotlivých vlákenných vrstev bylo použito analytických vah s přesností  $10^{-4}$  g umístěných v laboratořích katedry netkaných textilií. Po zapnutí a nakalibrování analytických vah byl vzorek vložen na misku vah. Následuje odečtení hodnoty hmotnosti vzorku na displeji a další měření. Princip vážení byl použit i pro zjišťování koncentrace vláken ve vrstvě. Vyrobená vlákenná vrstva se skládala ze dvou částí, což bylo způsobeno nestejnou šířkou nánosu vláken meltblown a nanovláken. Plocha vlákenné vrstvy se tedy skládala z pásma s obsahem meltblown vláken a nanovláken a ze samostatného pásu nanovláken. Pro zjišťování obsahu nanovláken ve vrstvě byly vytvořeny vzorky ze samostatné vrstvy nanovláken a stejně

tak ze směsi nanovláken a vláken meltblown. Následovalo jejich vážení a pomocí trojčlenky byl určen obsah nanovláken ve výsledné vrstvě. Vážení všech vzorků se řídilo normou pro stanovení plošné hmotnosti ISO 9073.1 – determination of mass per unit area.

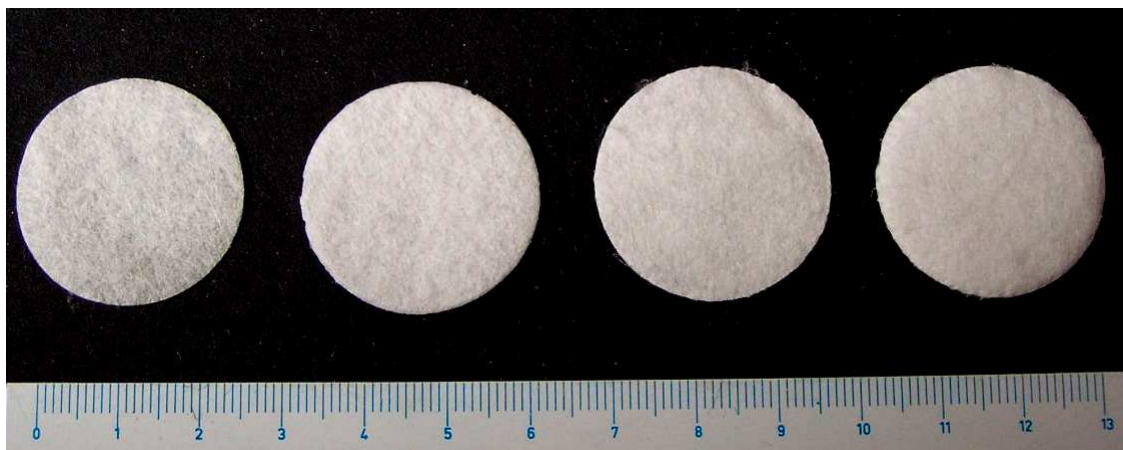
#### 4.3.7 Lucia G

Software pro obrazovou analýzu Lucia G sloužil k proměření průměrů vláken v jednotlivých vlákenných vrstvách. Pracoviště v prostorách laboratoří katedry netkaných textilií sestávalo z PC pracovní stanice se softwarem Lucia G a světelného mikroskopu. Každý snímek z elektronového mikroskopu byl samostatně proměřen, programový systém sám vyhodnotil průměrné hodnoty vláken s odpovídající směrodatnou odchylkou (viz. příloha 6).

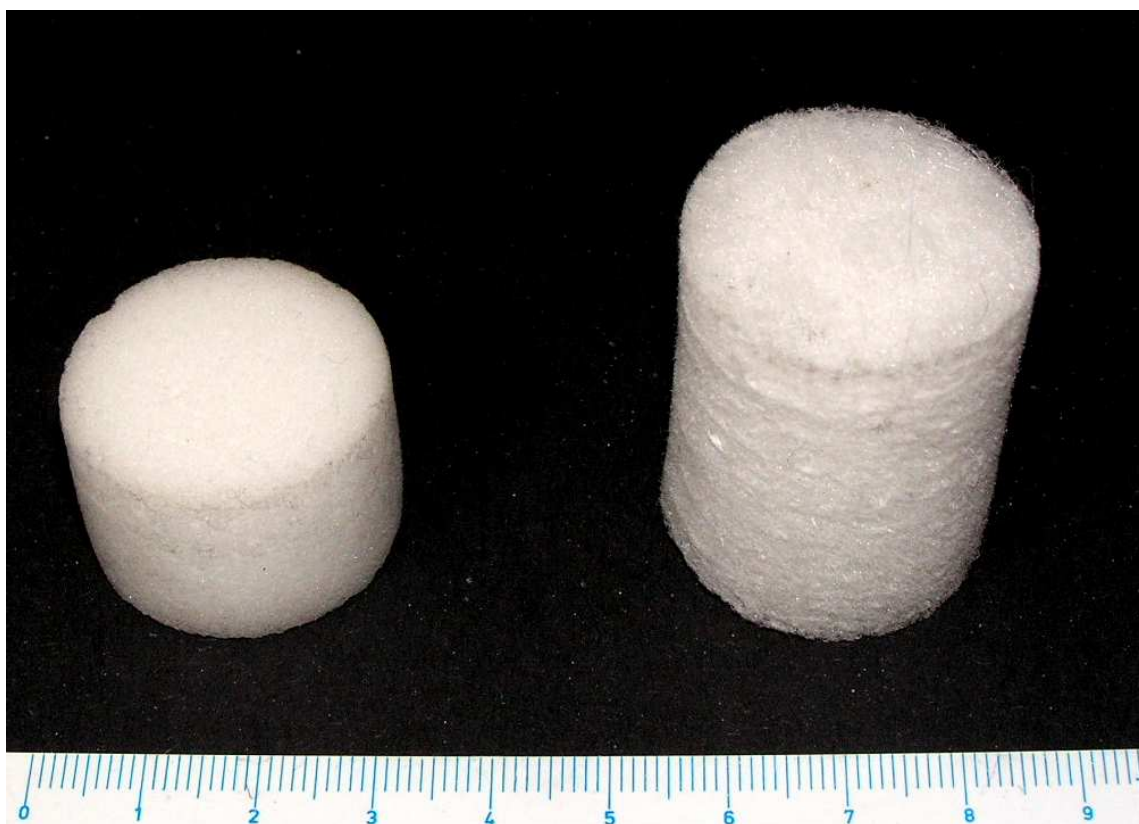
#### 4.4 Výroba vzorků

Výroba všech vzorků probíhala na laboratorním prototypu zařízení pro výrobu vláken kombinující technologii MB a technologii elektrostatického zvlákňování z válečku. Pro výrobu vlákenné vrstvy byly používány dva druhy polymeru. Pro výrobu nanovláken, byl použit roztok PVA složený z roztoku 16 %-ní PVA, 40 %-ní roztok glyoxalu, 85 % - ní roztok kyseliny fosforečné a destilované vody. Pro technologii meltblown byl zvolen polypropylen značky Borealis typ HL508FB s indexem toku 800 g/10min. Při výrobě jednotlivých vzorků byly měněny parametry procesu výroby vláken. Jedním z parametrů byla změna otáček extrudéru s cílem dosáhnout rozdílného poměru nanovláken a meltblown vláken ve výsledné vrstvě. Výsledkem byly čtyři vlákenné vrstvy s rozdílným poměrem MB a nanovláken a stejnou plošnou hmotností. Druhým parametrem pak byla změna počtu návinů vlákenné vrstvy na kolektoru, která měla ovlivnit plošnou hmotnost vzorků. Tímto způsobem byly vyrobeny čtyři vrstvy se stejným poměrem MB a nanovláken a různými plošnými hmotnostmi. Základní parametry procesu meltblown a elektrostatického zvlákňování byly u všech experimentů stejné. V případě elektrostatického zvlákňování to byla vzdálenost zvlákňovacího válečku od kolektoru 70 mm, zvlákňovací napětí 40 kV a obvod kolektoru 176 cm. Pro technologii meltblown pak vzdálenost trysky od kolektoru 55 cm, tlak 2 atm (odpovídající 202,65 kPa) a teploty na jednotlivých zónách - zóna<sub>1</sub>=300 °F, zóna<sub>2</sub>=350 °F, zóna<sub>3</sub>=400 °F, dále teplota trysky 500 °F a teplota vzduchu 500 °F.

Z výsledné vlákenné vrstvy byly za použití raznice a laboratorního etážového lisu vysekány vzorky o průměru 29 mm (obr. 21).



*Obr. 21: Vzorky vyrobených vlákenných vrstev o průměru 29mm pro měření v impedanční trubici*



*Obr. 22: Nosné materiály – PU pěna a PL vlákenný materiál o průměru 29 mm*

#### 4.4.1 Experiment č. I

Cílem experimentu číslo jedna bylo pokusit se vyrobit čtyři vlákenné vrstvy o různých plošných hmotnostech. Toho mělo být docíleno změnou rychlosti otáčení sběrného zařízení při zachování stejné doby zvlákňování ve všech čtyřech případech. Rychlost otáčení extrudéru byla 17,5 ot./min. Počet otáček a tomu odpovídající frekvence je zaznamenána v tab. 4. Změna plošné hmotnosti byla nepatrná, proto byl pokus proveden jiným způsobem v experimentu číslo 2.

*Tab. 4: Parametry experimentu č. I*

Číslo vzorku	Doba zvlákňování [min]	Otáčky kolektoru [ot./min]
1	5	2 (11,4 Hz)
2	5	3 (15,7 Hz)
3	5	4 (21,3 Hz)
4	5	5 (26,5 Hz)

#### 4.4.2 Experiment č. II

Cílem experimentu číslo dva bylo opět pokusit se vyrobit vlákenné vrstvy o různých plošných hmotnostech. V tomto případě toho bylo docíleno změnou počtu návinů na sběrné zařízení (kolektor). Počty návinů odpovídající vzorkům 1 – 4 jsou zapsány v tab. 5. Rychlost otáčení sběrného zařízení byla zachována pro všechny 4 vlákenné vrstvy na hodnotě 3 ot./min (15,7 Hz) a rychlost otáčení extrudéru 17,5 ot./min.

*Tab. 5: Parametry experimentu č. II*

Číslo vzorku	Počet návinů	Otáčky kolektoru [ot./min]
1	5	3 (15,7 Hz)
2	10	3 (15,7 Hz)
3	15	3 (15,7 Hz)
4	20	3 (15,7 Hz)



#### 4.4.3 Experiment č. III

Ve třetím experimentu byly vyráběny čtyři vlákenné vrstvy o různém poměru vláken meltblown a nanovláken. Jednou z možností změny tohoto parametru je změna otáček extrudéru. Otáčky extrudéru dle teoretických předpokladů přímo ovlivňují množství přiváděného polymeru k trysce a tím i podíl vláken ve výsledné vrstvě. Hodnoty nastavené na přístroji a tomu odpovídající otáčky extrudéru jsou zapsány v tab. 6. Výsledkem byla rozdílná koncentrace vláken ve vrstvě ale výrazně odlišná plošná hmotnost, kterou jsme chtěli zachovat na stejné hodnotě u všech vlákenných vrstev. Proto následoval experiment číslo čtyři.

Tab. 6: Parametry experimentu č. III

Číslo vzorku	Doba zvlákňování [min]	Otáčky kolektoru [ot./min]	Screw rpm
1	5	3 (15,7 Hz)	100 (7,5 ot./min)
2	5	3 (15,7 Hz)	200 (17,5 ot./min)
3	5	3 (15,7 Hz)	300 (28 ot./min)
4	5	3 (15,7 Hz)	400 (39 ot./min)

#### 4.4.4 Experiment č. IV

Zachování stejné plošné hmotnosti u všech vlákenných vrstev bylo docíleno přepočtem z doby zvlákňování a plošné hmotnosti v experimentu číslo tři. Plošné hmotnosti vyrobených vrstev si již přibližně odpovídali. Parametry procesu výroby vlákenné vrstvy jsou v tab. 7.

Tab. 7: Parametry experimentu č. IV

Číslo vzorku	Doba zvlákňování	Otáčky kolektoru [ot./min]	Screw rpm
1	6 min	3 (15,7 Hz)	100 (7,5 ot./min)
2	3 min 15 sec	3 (15,7 Hz)	200 (17,5 ot./min)
3	1 min 31 sec	3 (15,7 Hz)	300 (28 ot./min)
4	1 min	3 (15,7 Hz)	400 (39 ot./min)



#### 4.4.5 Experiment č. V

Experiment číslo pět sloužil k výrobě samostatných vlákenných vrstev vyrobených technologií meltblown, které měly parametry odpovídat vlákenným vrstvám získaným v experimentu čtyři. Parametry procesu výroby vlákenné vrstvy jsou v tab. 8.

*Tab. 8: Parametry experimentu č. V*

Číslo vzorku	Doba zvlákňování	Otáčky kolektoru [ot./min]	Screw rpm
1	6 min	3 (15,7 Hz)	100 (7,5 ot./min)
2	3 min 13 sec	3 (15,7 Hz)	200 (17,5 ot./min)
3	1 min 31 sec	3 (15,7 Hz)	300 (28 ot./min)
4	1 min 3 sec	3 (15,7 Hz)	400 (39 ot./min)

#### 4.4.6 Experiment č. VI

Experiment číslo šest sloužil k výrobě samostatných vlákenných vrstev vyrobených technologií meltblown, které měly parametry odpovídat vlákenným vrstvám získaným v experimentu číslo dva. Parametry procesu výroby vlákenné vrstvy jsou v tab. 9.

*Tab. 9: Parametry experimentu č. VI*

Číslo vzorku	Počet návinů	Otáčky kolektoru [ot./min]
1	5	3 (15,7 Hz)
2	10	3 (15,7 Hz)
3	15	3 (15,7 Hz)
4	20	3 (15,7 Hz)

#### 4.5 Označení vzorků

Samotné vzorky byly označovány pomocí podílu vláken a plošné hmotnosti. Jako první je v označení uveden podíl vláken meltblown a za lomítkem následuje daná plošná hmotnost.

**Příklad:**

98/40 – vzorek s 98 %-ním podílem vláken meltblown – „98“ a plošnou hmotností  $40 \text{ g/m}^2$  – „40“.

100/55 – vzorek se 100 %-ním podílem vláken meltblown – „100“ a plošnou hmotností  $55 \text{ g/m}^2$  – „55“

99/86 – vzorek s 99 %-ním podílem vláken meltblown – „99“ a plošnou hmotností  $86 \text{ g/m}^2$  – „86“

Vzorky pro měření činitele zvukové pohltivosti byly označovány dle použitého nosného materiálu, podílů vláken meltblown a plošné hmotnosti. Nejprve je uvedeno materiálové složení nosného materiálu a to polyester nebo polyuretan. Za lomítkem pak následuje podíl vláken MB specifický pro daný vzorek a nakonec pak odpovídající plošná hmotnost vzorku.

**Příklad:**

PL/98/54 – jedná se o vzorek, jež byl měřen s nosným materiálem z polyesterové vlákenné vrstvy – „PL“, výsledný podíl vláken MB ve vrstvě byl 98 % - „98“ a plošná hmotnost vzorku byla  $54 \text{ g/m}^2$  – „54“.

PU/96/82 – měření tohoto vzorku bylo prováděno s nosným materiálem z polyuretanové pěny – „PU“, podíl vláken MB ve vlákenné vrstvě byl 96 % - „96“ a plošná hmotnost vzorku pak byla  $82 \text{ g/m}^2$  – „82“.

PL/100/86 – jde o vzorek, který byl měřen s nosným materiálem z polyesterové vlákenné vrstvy – „PL“, výsledný podíl vláken MB ve vrstvě byl 100 % - „100“ a plošná hmotnost vzorku byla  $85 \text{ g/m}^2$  – „85“.

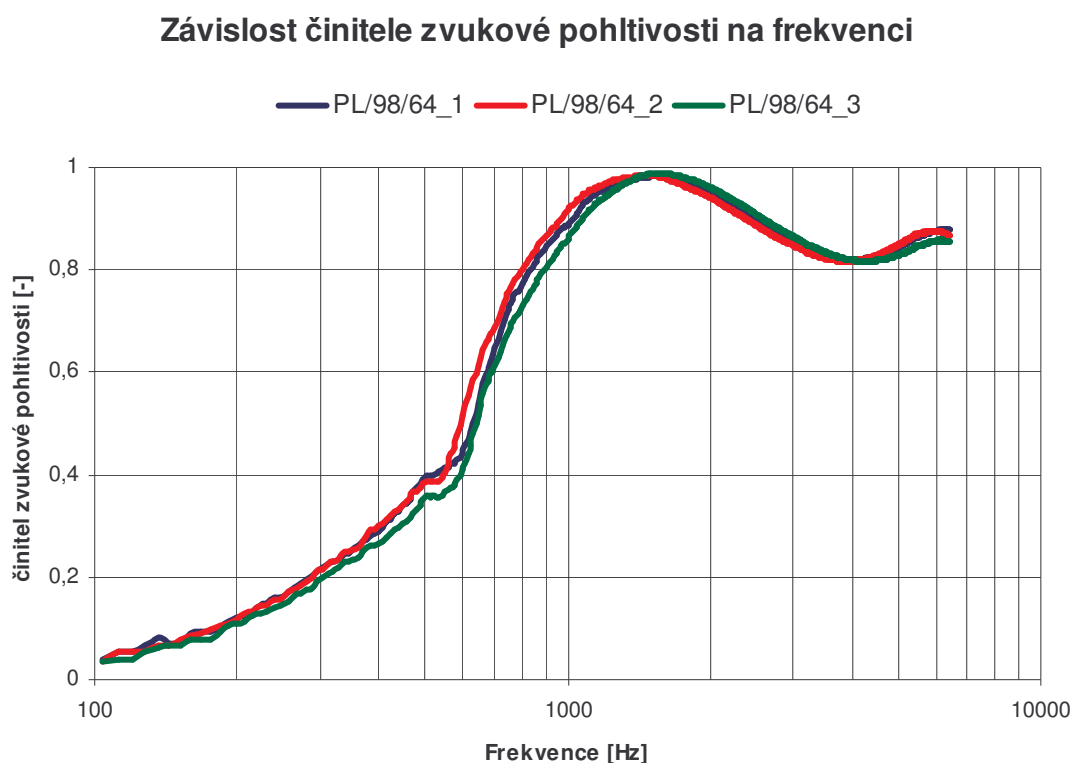
**4.6 Postup měření činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$** 

Činitel zvukové pohltivosti všech vzorků byl měřen pomocí dvoumikrofonové impedanční trubice Brüel and Kjær typ 4206 umístěné v laboratořích katedry vozidel a motorů. Používala jsem vzorky o průměru 29 mm. Zkoumaný vzorek se skládal z vyrobené vlákenné vrstvy a nosného materiálu typu PL nebo PU (obr. 22). Nosný materiál PL se skládal z bikomponentních vláken typu jádro/plášť (80PL/20co-PL) a

polyesterových vláken. Nosný materiál typu PU byla polyuretanová pěna. Vzorek byl vložen do trubky o průměru 29 mm. Pomocí pístu byla nastavena správná poloha vzorku v trubici a následně byla trubice upevněna do otevřeného konce velké trubky s reproduktorem. Nakonec byl spuštěn zdroj zvuku a proces měření. Výsledné hodnoty byly vloženy do programu Excel a graficky zpracovány.

#### 4.7 Statistické vyhodnocení

Pro možnost provedení statistického vyhodnocení byly parametry vlákenné vrstvy a čísel zvukové pohltivosti proměřeny na třech vzorcích se shodnými výrobními parametry. Výsledný rozměr vlákenné vrstvy získaný z jednotlivých experimentů byl výrazně ovlivněn výrobní kapacitou zařízení. Nebylo tedy možné vytvořit dostatečné množství vzorků pro provedení většího počtu opakovaných měření. Grafy závislosti čísel zvukové pohltivosti pro stejnou vlákennou vrstvu si téměř odpovídaly (obr. 23), proto byl do výsledných grafů vynesena odhad střední hodnoty v podobě průměru.



Obr. 23: Opakované měření závislosti čísel zvukové pro stejný typ materiálu

## 4.8 Výsledky a zhodnocení měření

Cílem experimentální části a celé diplomové práce je vytvořit materiál s obsahem nanovláken, který nám poskytne lepší zvukovou absorpci v oblasti nižších frekvencí než běžné materiály. Hlavním parametrem, který sloužil k posuzování zvukové absorpce, byl činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$ . Parametry charakterizující výslednou vrstvu, jež mohou mít vliv na průběh  $\alpha$  jsou znázorněny v tabulce výsledků (tab. 10). Hlavními parametry vlákenné vrstvy pro tuto práci jsou plošná hmotnost, podíl nanovláken a vláken typu meltblown a vliv složení materiálu.

Tab. 10: Výsledné parametry vlákenných vrstev

Vzorek	Plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	Poměr MB/NN vláken [%]	Průměr nanovláken [nm]	Průměr vláken MB [nm]	Tloušťka vrstvy [mm]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
98/40	40	98/2	240	3215	1,0	39,6
98/54	54	98/2	218	3205	1,2	44,8
98/64	64	98/2	216	3301	1,3	49,6
98/190	190	98/2	184	2795	3,3	58,3
100/43	43	100/0			1,0	41,0
100/55	55	100/0			2,0	27,0
100/68	68	100/0			2,1	32,8
100/175	175	100/0			3,8	45,0
96/82	82	96/4	319	2795	2,3	38,0
97/81	81	97/3	353	5039	2,2	39,1
98/87	87	98/2	380	13383	2,5	35,4
100/80	80	100/<1	356	5715	2,2	39,7
100/87	87	100/0			2,1	38,4
100/87	87	100/0			2,2	37,6
100/88	88	100/0			2,8	30,6
100/86	86	100/0			2,3	35,5

#### 4.8.1 Závislost činitele zvukové pohltivosti $\alpha$ na plošné hmotnosti vlákně vrstvy

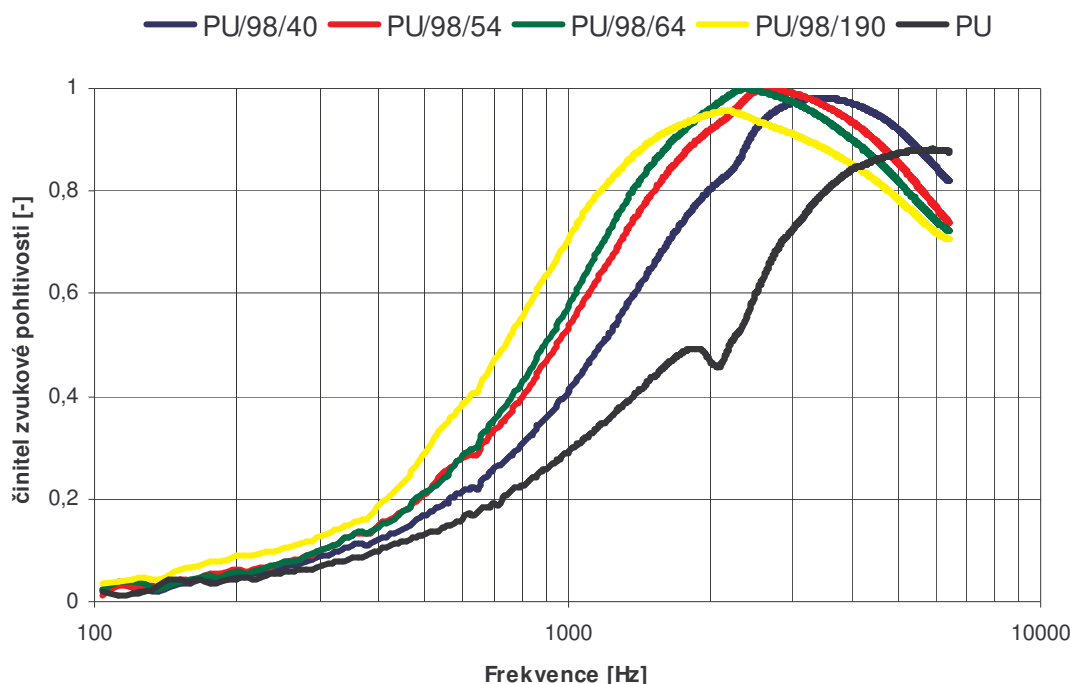
Vzorky pro měření byly zhotoveny ze směsi nanovláken a vláken typu meltblown. Plošná hmotnost jednotlivých vzorků byla postupně zvyšována (40, 54, 64, 190 g/m<sup>2</sup>) počtem návinů na sběrné zařízení. Všechny vzorky byly při měření umístěny v měřicí trubici přímo za odrazivou stěnou.

V následujícím grafu (obr. 24) jsou znázorněny výsledky měření činitele zvukové pohltivosti v závislosti na zvyšující se plošné hmotnosti. Křivky v grafech zobrazují naměřenou závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci. V jednom grafu jsou vždy znázorněny čtyři průběhy naměřené závislosti pro vzorky se stejným podílem nanovláken a vláken typu meltblown a s rozdílnou plošnou hmotností a současně naměřená závislost pro samotný nosný materiál. Druhý graf (obr. 25) pak znázorňuje naměřenou závislost činitele zvukové pohltivosti pro vrstvu vyrobenou pouze technologií meltblown a pro samotný nosný materiál. Grafy uvedené v této kapitole znázorňují závislost  $\alpha$  s použitím polyuretanové pěny PU jako nosného materiálu. Grafické vyjádření závislosti činitele zvukové pohltivosti s použitím polyesterové vlákně vrstvy jako nosného materiálu je v příloze 2.

V grafu 24 je vidět, že se křivky v rozmezí 100 - 300 Hz téměř kopírují a začínají výrazně růst až kolem frekvence 500 Hz. Stoupají k maximálním hodnotám v oblasti 2000 až 4000 Hz a pak začínají opět klesat. Dále je vidět že vlákně vrstva s nejnižší plošnou hmotností dosahuje svého maxima v oblasti 4000 Hz. Se zvyšující se plošnou hmotností se maximum činitele zvukové pohltivosti přesunuje k nižším hodnotám frekvencí. Materiály s plošnou hmotností 54 g/m<sup>2</sup> a 64 g/m<sup>2</sup> dosahují nejvyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti 1, zatímco vzorky s plošnou hmotností 40 g/m<sup>2</sup> a 190 g/m<sup>2</sup> nedosahují maxima činitele zvukové pohltivosti v žádné oblasti frekvence. Stejně tak podkladový materiál.

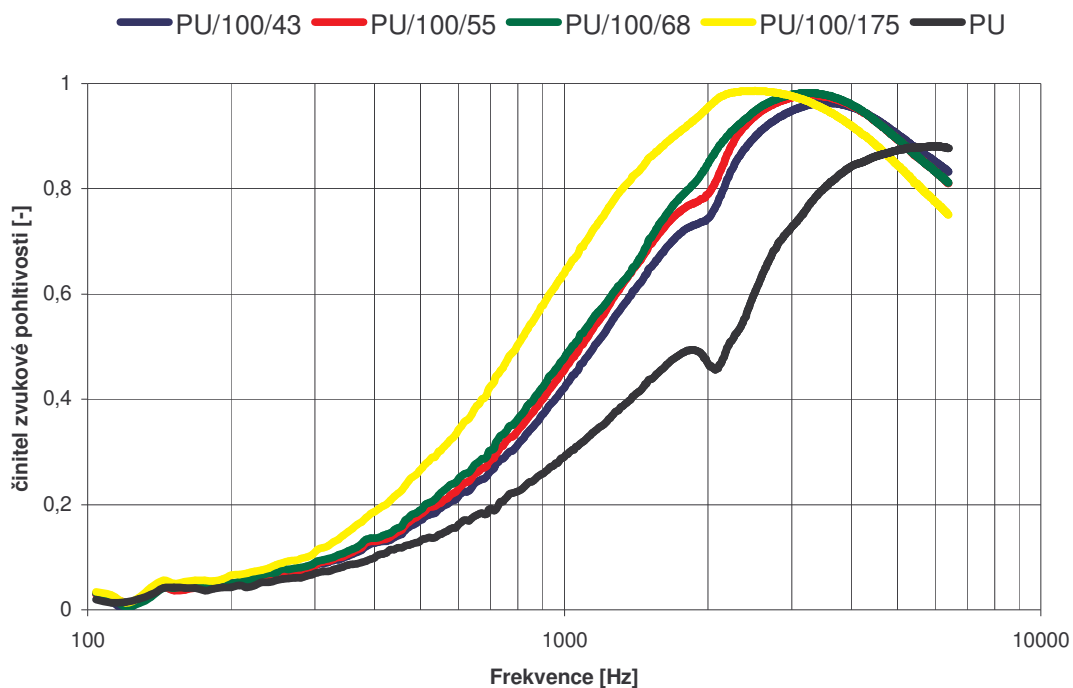
Můžeme říci, že měřený materiál všeobecně lépe pohlcuje v pásmu vyšších frekvencí. Dále můžeme vidět zlepšení zvukové pohltivosti nosného materiálu v kombinaci s vlákně vrstvou. Z grafů lze vyčíst, že s rostoucí plošnou hmotností dochází ke zvyšování hodnoty činitele zvukové pohltivosti v oblastech nižších frekvencí.

### Vliv plošné hmotnosti na činitel zvukové pohltivosti



Obr. 24: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenných vrstev se shodným podílem MB a NN vláken (2 % NN) a s rozdílnou plošnou hmotností (40, 54, 64 a 190 g/m<sup>2</sup>) na nosném podkladu z polyuretanové pěny (PU).

Méně patrný vliv plošné hmotnosti na činitel zvukové pohltivosti je pak vidět v grafu 25, který zobrazuje závislost  $\alpha$  na frekvenci pro samotnou vrstvu meltblown vláken bez obsahu nanovláken. V grafu 25 je vidět, že křivky znázorňující vzorky s plošnou hmotností 43, 55 a 68 g/m<sup>2</sup> se v průběhu měření drží blízko u sebe (téměř se kopírují). Jediná vybočující křivka odpovídá plošné hmotnosti 175 g/m<sup>2</sup>, což je patrně důsledek velkého rozdílu v plošné hmotnosti oproti ostatním vzorkům. Následkem toho a ze srovnání grafu 24 a 25 můžeme pozorovat i pravděpodobný patrný vliv obsahu nanovláken ve vrstvě na činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$ . A lze říci, že nanovlákná obsažená ve vrstvě zvyšují hodnoty  $\alpha$  při vystavení nižších frekvencí.

**Vliv plošné hmotnosti na činitel zvukové pohltivosti - MB**

Obr. 25: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenných vrstev vyrobených pouze technologií meltblown a s rozdílnou plošnou hmotností (43, 55, 68 a 175 g/m<sup>2</sup>) přibližně odpovídající plošným hmotnostem vrstev zobrazených v grafu 23 na nosném podkladu z polyuretanové pěny (PU).

#### 4.8.2 Závislost činitele zvukové pohltivosti $\alpha$ na množství nanovláken ve vlákenné vrstvě

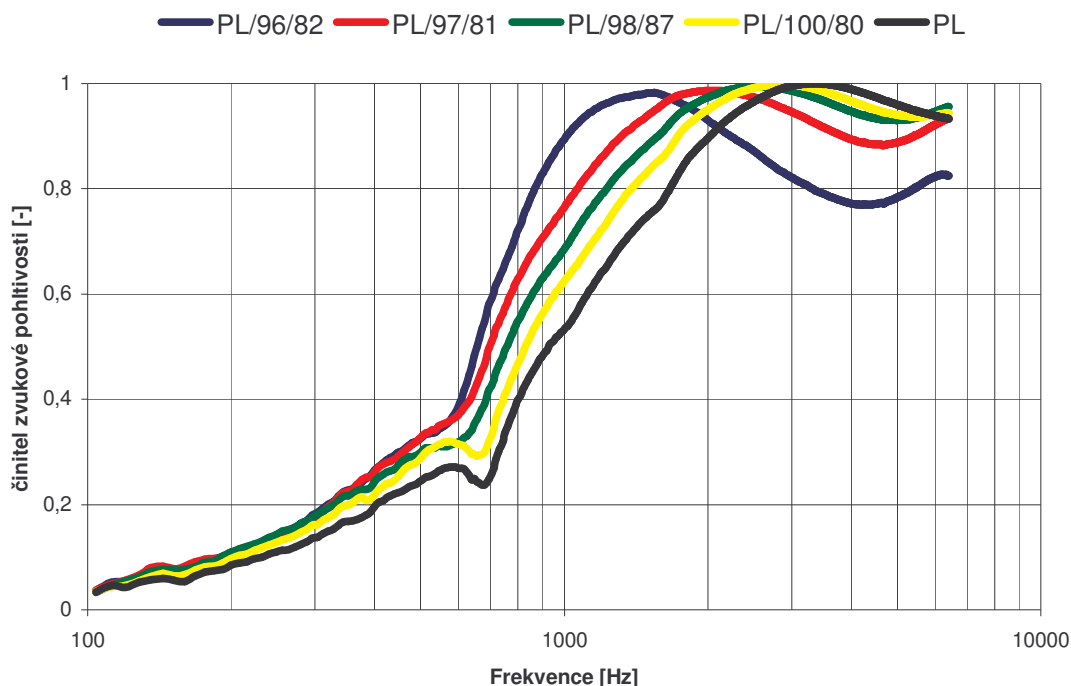
Toto měření bylo provedeno na vzorcích zhotovených ze směsi nanovláken a vláken typu meltblown a samostatných vlákenných vrstev meltblown. Plošná hmotnost jednotlivých vzorků byla téměř shodná. V tomto případě byl měněn poměr obsahu nanovláken a meltblown vláken (96/4, 97/3, 98/2, 100/<1) změnami otáček extrudéru jednotky meltblown. Meltblown zařízení umožnilo nastavit pouze výše uvedené poměry vláken. Všechny vzorky byly při měření umístěny v měřicí trubici přímo za odrazivou stěnou.

Křivky v následujícím grafu (obr. 26) jsou znázorněním výsledků měření činitele zvukové pohltivosti v závislosti na zvyšujícím se množství nanovláken ve vrstvě. Křivky v grafech znázorňují naměřenou závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci. Graf 26 zobrazuje průběh závislosti pro čtyři vlákenné vrstvy s téměř shodnou plošnou hmotností a různým obsahem nanovláken. Černě znázorněná křivka pak představuje závislost samotného nosného materiálu. Závislost činitele zvukové pohltivosti pro vrstvu vyrobenou pouze technologií meltblown je v grafu 27. Oba grafy představují závislost činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  při jejichž měření bylo jako nosného materiálu použito polyesterové vlákenné vrstvy PL. Zobrazení závislosti  $\alpha$  na frekvenci pro nosný materiál z polyuretanové pěny PU je v příloze 3.

Jak je vidět v grafu 26 křivky závislosti pro jednotlivé vzorky začínají výrazněji růst kolem hodnoty frekvence 600 Hz. Současně je vidět že průběh závislosti  $\alpha$  pro jednotlivé vzorky je až do hodnoty frekvence 600 Hz téměř totožný. V tomto případě dosahují všechny vzorky maxima  $\alpha=1$ , a to v rozmezí frekvencí 1500 až 3000 Hz. Následuje mírný pokles činitele  $\alpha$  a opět nepatrný nárůst. Vlivem zvyšujícího se obsahu nanovláken ve vzorku dochází ke zvyšování schopnosti materiálu pohlcovat zvuk v nižších frekvencích. Vlákenná vrstva s nejvyšším obsahem nanovláken vykazuje výbornou pohltivost pro interval frekvence 1000 – 2000 Hz. Následuje výraznější pokles při vyšších frekvencích než u ostatních vzorků.



### Vliv množství nanovláken na činitel zvukové pohltivosti

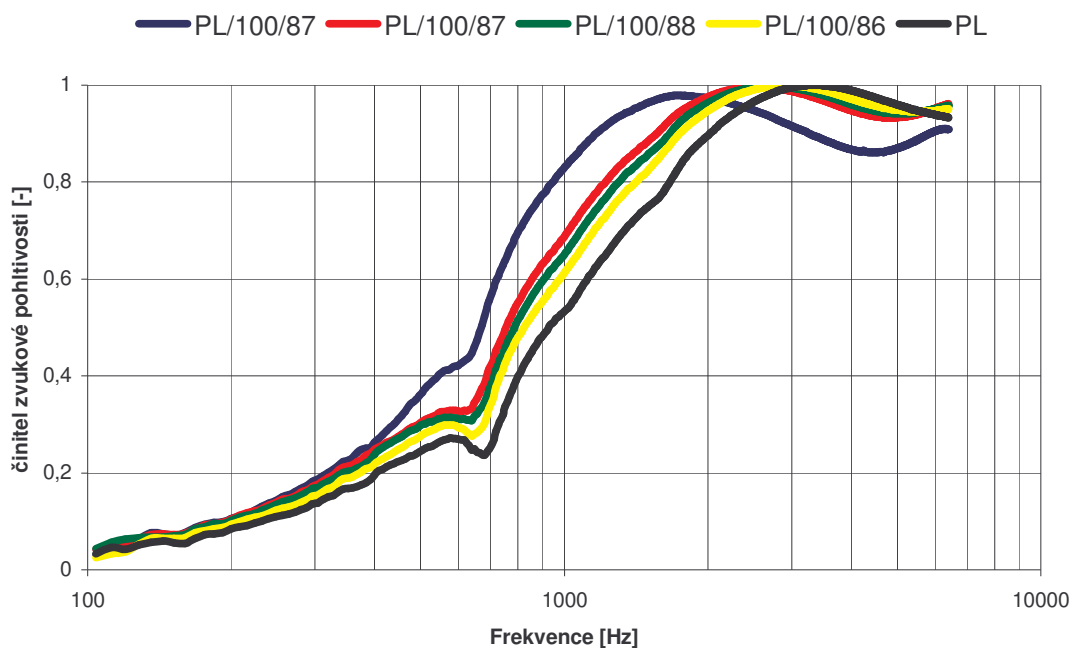


Obr. 26: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenných vrstev s přibližně shodnou plošnou hmotností ( $82, 81, 87$  a  $80 \text{ g/m}^2$ ) a rozdílným podílem MB a NN vláken (4, 3, 2 a  $<1 \%$  NN) na nosném podkladu z polyesterové vláknenné vrstvy (PL).

Z výsledného grafu 26 je vidět vliv množství nanovláken obsažených ve vláknenné vrstvě. Můžeme říci, že s rostoucím množstvím nanovláken ve vzorku vzrostl i činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  v oblasti nižších frekvencí. Současně je z grafu patrné i zlepšení  $\alpha$  s použitím vyrobené vláknenné vrstvy oproti samotnému nosnému materiálu.

Graf 27 závislosti činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  na frekvenci pro vrstvu s nulovým podílem nanovláken zobrazuje vliv nanovláken na zvukovou absorpci. Je vidět, že křivky závislosti pro vzorky PL/100/87, PL/100/88 a PL/100/86 se téměř shodují v celém pásmu působící frekvence. Jedinou vybočující závislostí je pak PL/100/87, což může být důsledkem dalších parametrů vláknenné vrstvy ovlivňujících zvukovou pohltivost materiálu (viz tab. 10).

### Vliv množství nanovláken na činitel zvukové pohltivosti - MB

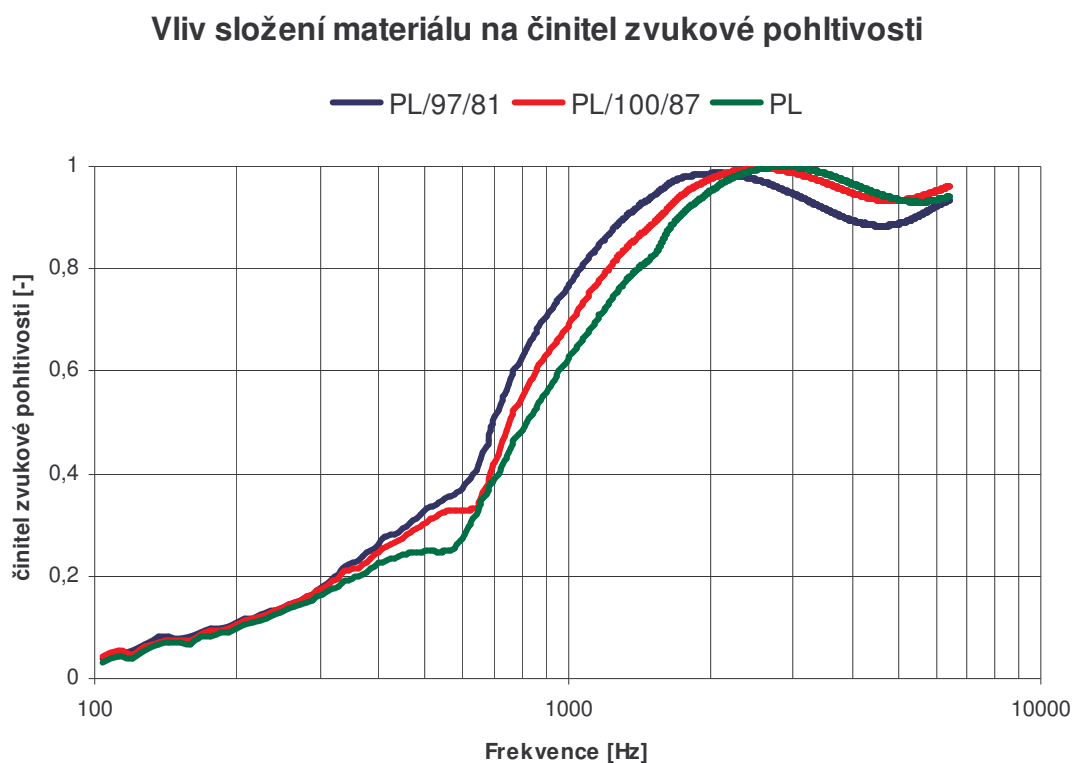


Obr. 27: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenných vrstev vyrobených pouze technologií meltblown s přibližně shodnou plošnou hmotností (87, 87, 88 a 86 g/m<sup>2</sup>) téměř odpovídající plošným hmotnostem vrstev zobrazených v grafu 25 na nosném podkladu z polyesterové vláknenné vrstvy (PL).

#### 4.8.3 Vliv složení materiálu na činitel zvukové pohltivosti $\alpha$

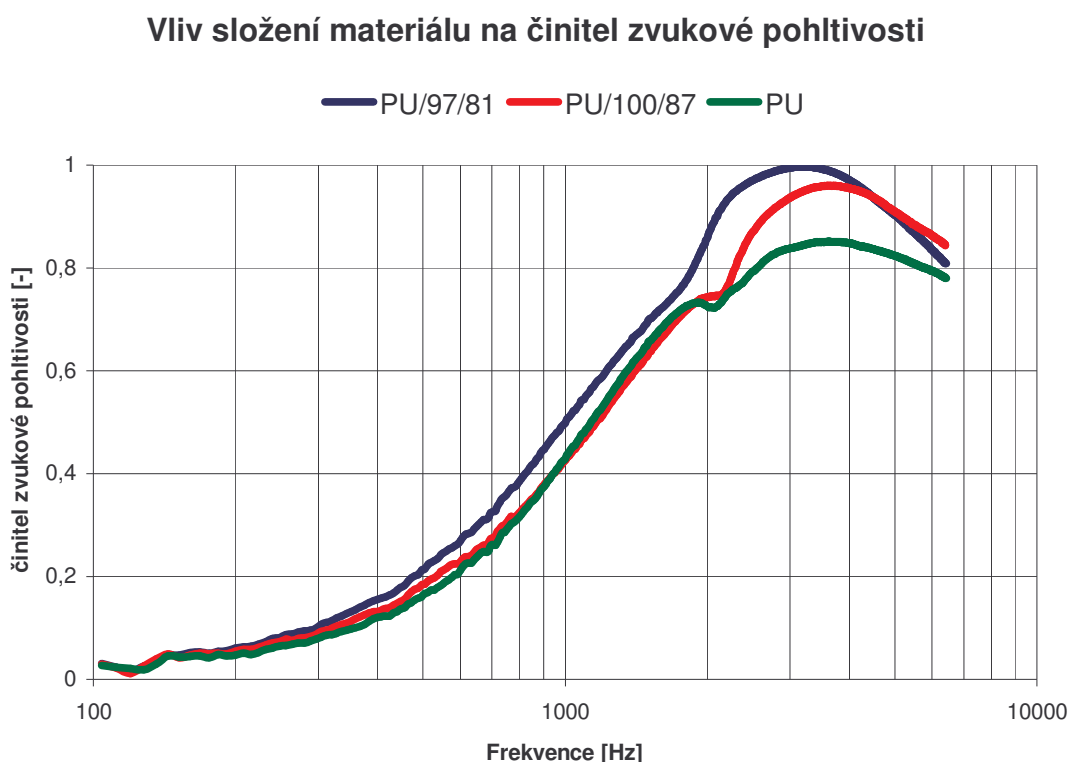
Křivky zobrazené v následujících grafech (obr. 28, obr. 29) jsou znázorněním výsledků měření součinitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci pro materiál s tříprocentním obsahem nanovláken, pro materiál z melblownových vláken s nulovým obsahem nanovláken a pro samotný nosný materiál. Grafy zobrazují výsledky vzorků o přibližně stejné plošné hmotnosti, s výjimkou nosného materiálu.

Z grafu 28 je patrné zvýšení hodnoty činitele zvukové pohltivosti v oblasti nižších frekvencí u vzorku, který obsahuje nanovlákná v porovnání s nosným materiálem PL i v porovnání se vzorkem s nulovým obsahem nanovláken. Činitel zvukové pohltivosti pro jednotlivé vrstvy se začíná měnit okolo frekvence 400 Hz. Nejvyšších hodnot činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  pak vzorky dosahují při působící frekvenci v rozsahu 2000 až 3500 Hz.



Obr. 28: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vlákenné vrstvy s obsahem nanovláken (3 % NN), samotného nosného materiálu z polyesterové vlákenné vrstvy (PL) a vlákenné vrstvy vyrobené pouze technologií melblown.

V případě grafu 29 kde je sledován vliv materiálového složení vrstvy na polyuretanové pěně PU můžeme pozorovat stejný vliv obsahu nanovláken na absorpci zvuku o nízkých frekvencích při měření s nosným materiálem PU. V grafu 29 je vidět, že materiál s obsahem nanovláken dosáhl vyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti téměř v celém rozsahu působící frekvence. Další grafy zobrazující vliv složení materiálu pro ostatní vzorky jsou v příloze 4. Všeobecně lze říci, že s rostoucím podílem nanovláken ve vrstvě roste i činitel zvukové pohltivosti pro nižší frekvence, i když z měření pro materiál s obsahem nanovláken menším než 2 % to není tolik patrné.



*Obr. 29: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenné vrstvy s obsahem nanovláken (3 % NN), samotného nosného materiálu z polyuretanové pěny (PU) a vláknenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown.*

## 5 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vyrobit vlákenné vrstvy ze směsi nanovláken a vláken typu meltblown, tak aby odpovídaly zadaným parametrům. Následně tyto vrstvy podrobit působení zvukových vln a vyhodnotit jejich chování s ohledem na jejich parametry. Základními parametry, které dle předpokladů měly zvýšit absorpci vlákenné vrstvy v oblasti nižších frekvencí, pak byla plošná hmotnost a podíl nanovláken ve vrstvě.

V případě, kdy byla hlavním záměrem změna plošné hmotnosti, se podařilo vyrobit čtyři vlákenné vrstvy o přibližně stejném podílu nanovláken (2 %) a o různých plošných hmotnostech. A to změnou počtu jednotlivých vrstev. Plošné hmotnosti pak byly 40, 54, 64 a 190 g/m<sup>2</sup>. Pro změnu obsahu nanovláken bylo využito změny otáček extrudéru jednotky meltblown. Tímto postupem byly získány čtyři vlákenné vrstvy s podílem nanovláken 4, 3, 2 a <1 % a přibližně stejnou plošnou hmotností 80 g/m<sup>2</sup>. Zařízení meltblown umožnilo nastavit pouze výše uvedené poměry vláken. Následně byly vyrobeny vrstvy pouze metodou meltblown odpovídající parametry předchozím vrstvám, které sloužily k výslednému vyhodnocení. Všechny vyrobené vzorky byly měřeny v kombinaci s nosným materiálem.

V případě změny plošné hmotnosti dosahuje nejvýraznějšího zlepšení pohlcování v oblasti nižších frekvencí vrstva s nejvyšší plošnou hmotností. Výsledky měření zabývající se vlivem množství nanovláken obsažených ve vrstvě rovněž ukazují, že vrstva s nejvyšším obsahem nanovláken poskytuje zvýšení činitele zvukové pohltivosti v oblasti nižších frekvencí. A to ve srovnání se vzorky neobsahujícími nanovláka i ve srovnání se vzorky s nižším obsahem nanovláken.

Dle výsledků této práce lze říci, že obsah nanovláken ve vlákenné vrstvě zvyšuje schopnost vlákenné vrstvy pohlcovat zvuk o nižších frekvencích. V tomto případě byla výroba vzorku do značné míry ovlivněna výrobní kapacitou zařízení, proto výsledky měření činitele zvukové pohltivosti nedosahují výraznějších změn. Pro další výzkum vlivů jednotlivých parametrů by bylo vhodné zaměřit se na výrobu vzorků s vyšším podílem nanovláken ve vrstvě, zařízení které bylo k dispozici nám to neumožňovalo. Dalším doporučením pak je pokusit se vyrobit vzorky větších rozměrů, které by současně poskytly možnost provést opakovaná měření ve větším počtu.

## 6 Literatura

- [1] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. 2.vyd. Praha: ČVUT, 2000. 389 s. ISBN 80-01-02246-3.
- [2] KUTMAN, O. *Fyzika II: Akustika*. 1.vyd. Praha: ČVUT, 1991. 59 s. ISBN 80-01-00655-7
- [3] KOLMER, F., KYNCL, J. *Prostorová akustika*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1980. 242 s.
- [4] RŮŽIČKOVÁ, J. *Elektrostatické zvlákňování nanovláken*. 2.vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. 54 s. ISBN 80-7372-066-3
- [5] DAHIYA, Atul; KAMATH, M. G.; HEGDE, Raghavendra R. Melt Blown Technology. In *Nonwovens Science and Technology II*. [s. l.] : [s. n.], 2004 [cit. 2009-11-18]. Dostupné z WWW: <<http://web.utk.edu/~mse/Textiles/index.html>>.
- [6] BALLOU, Glen. *Handbook for sound engineers*. USA: Focal Press, 2002. 1530 s. ISBN 0-240-80758-8.
- [7] JIRSÁK O., KALINOVÁ K. *Netkané textilie*. 1.vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003. 129 s. ISBN 80-7083-746-2
- [8] DUCHÁČEK V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. 276 s. ISBN 80-7080-617- 6
- [9] GODDARD A. W., BRENNER W. D., LYSHEVSKI E. S., IAFRATE J. G.: *Handbook of nanoscience, engineering, and technology*. 2. vyd. CRC press, USA 2007. 1080 s. ISBN 0-8493-7563-0
- [10] GUPTA V. B., KOTHARI V. K.: *Manufactured fiber technology*. 1. vyd. Chapman and Hall, London 1997. 661 s. ISBN 0-412-54030-4
- [11] CALHOUN A.: *Polymer chemistry – properties and applications* . 2. vyd. Hanser, Mnichov 2006. 397 s. ISBN 1-56990-397-2
- [12] PINCHUK L. S., GOLDADE V. A., MAKAREVICH A. V., KESTELMAN V.N.: *Melt blowing equipment, technology, and polymer fibrous materials*. 1. vyd. Springer, Německo 2002. 212 s. ISBN 3-540-432223-X
- [13] KOIZUMI, T.; TSUJIUCHI, N.; FUJITA, K. Performance Improvement of Sound-Absorbing Materials Using Natural Bamboo Fibers and Their Application. In. *Structures and Materials II*. [s. l.] : [s. n.], 2004. s. 461-470.
- [14] KINO, Naoki; UENO, Takayasu. Evaluation of acoustical and non-acoustical properties of sound absorbing materials made of polyester fibres of various cross-section shapes. *Applied acoustics*. 2007, 69, s. 575-582.

- [15] GRONDZIK, Walter T; KWOK, Alison G; STEIN, Benjamin. *Mechanical and Electrical Equipment for Buildings*. Hardbound : John Wiley & Sons, 2009. 1 766 s. ISBN 0470195657.
- [16] HONG, Zhou; BO, Li; GUANGSU, Huang. Sound absorption behavior of multiporous hollow polymer micro-spheres. *Materials letters*. 2006, 60, s. 3451-3456.
- [17] SGARD, Franck C., et al. On the use of perforations to improve the sound absorption of porous material. *Applied acoustics*. 2004, 66, s. 625-651.
- [18] KIRBY, R.; CUMMINGS, A. Prediction of the bulk acoustic properties of fibrous materials at low frequencies. *Applied acoustics*. 1998, 56, s. 101-125.
- [19] WANG, Chao-Nan; TORNG, Jiunn-Hwan. Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials. *Applied acoustics*. 2001, 62, s. 447-459.
- [20] HOPKINS, Carl. *Sound insulation*. Indie: Butterworth-Heinemann, 2007. 622 s. ISBN 978-0-7506-6526-1.
- [21] CASTAGNÉDE, Bernard; AKNINE, Achour; BROUARD, Bruno. Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials. *Applied acoustics*. 2000, 61, s. 173-182.
- [22] LEE, C. M.; WANG, Y. S. A prediction method of the acoustical properties of multilayered noise control materials in standing wave-duct systems. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, 298, s. 350-365.
- [23] MULHOLLAND, K. A.; PRICE, A. J. The effect of surface treatment on sound-absorbing materials . *Applied acoustics*. 1968, 1, s. 67-72.
- [24] SALISSOU, Yacoubous ; PANNETON, Raymond. Comparison of Methods for Characterizing Sound Absorbing Materials. *Classical Physics*. 2006, 2, s. 32-33.
- [25] GARAI, Massimo; POMPOLI, Francesco. A simple empirical model of polyester fiber materials for acousticals applications. *Applied acoustics*. 2005, 66, s. 1383-1398.
- [26] JIANG, Nan. *Fabrication and evaluation of specialty nonwoven materials*. USA, 2008. 85 s. Dizertační práce. Louisiana State University.
- [27] LEFEBVREM, Louis Philippe; BANHART, John; DUNAND, David C. *Porous Metals and Metallic Forms*. DEStech publications : Kanada, 2008. 527 s. ISBN 978-1-932078-28-2.
- [28] *Bp1039.pdf* [online]. 2009 [cit. 2009-10-29]. Odkazy. Dostupné z WWW: <<http://www.bksv.com/doc/Bp1039.pdf>>.
- [29] Polypropylen In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2009-12-10]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>>.

- [30] Nanovláknno In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-01-30]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanovláknno>>.
- [31] COX, Trevor J.; D'ANTONIO, Peter. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application*. USA: Spon Press, 2004. 405 s. ISBN 0-415-29649-8.
- [32] STUDÝNKA, Vojtěch. *Materiály pro snižování hluku a vibrací* [online]. [s.l.], 2005. 29 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Dostupné z WWW: <[https://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download\\_this\\_unauthorized=1960](https://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download_this_unauthorized=1960)>.
- [33] YILMAZ, Nazire Deniz. *Acoustic Properties of Biodegradable Nonwovens*. Raleigh, North Carolina, 2009. 297 s. Dizertační práce. North Carolina State University.
- [34] *Výzkumná činnost: Katedra textilních materiálů* [online]. 2004 [cit. 2010-04-26]. Rastrovací elektronová mikroskopie. Dostupné z WWW: <[http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/vyzkumna\\_cinnost](http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/vyzkumna_cinnost)>.
- [35] JIRSÁK, Oldřich, et al. *Espacenet* [online]. 2009 [cit. 2010-04-5]. Method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method . Dostupné z WWW: <[http://v3.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=7585437B2&KC=B2&FT=D&date=20090908&DB=EPODOC&locale=en\\_EP](http://v3.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=7585437B2&KC=B2&FT=D&date=20090908&DB=EPODOC&locale=en_EP)>.
- [36] Katedry textilních materiálu, TUL. *Informační materiál - tloušťkoměru typu FF-77*.
- [37] LESK, Jiří, *Schéma etážového lisu*. 2008
- [38] YOUNEUNG, Lee; CHANGWHAN, Joo. Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers. *AUTEX Research Journal*. 2003, 3, 2, s. 78-84. Dostupný také z WWW: <[http://www.revistavirtualpro.com/files/TIE05\\_200704.pdf](http://www.revistavirtualpro.com/files/TIE05_200704.pdf)>.
- [39] ŠKVOR, Zdeněk. *Akustika a elektroakustika*. [s.l.] : Academia, 2001. 528 s. ISBN 80-200-0461-0.



## 7 Seznam příloh

**Příloha 1** – složení zvláknovacího roztoku PVA

**Příloha 2** – závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vlákenné vrstvy s rozdílnou plošnou hmotností a stejným podílem nanovláken (obr. 30) a tomu odpovídající vlákenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown (obr. 31)

**Příloha 3** – závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vlákenné vrstvy se stejnou plošnou hmotností a rozdílným podílem nanovláken (obr. 32) a tomu odpovídající vlákenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown (obr. 33)

**Příloha 4** - závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci získaný při měření samotného nosného materiálu, vlákenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown a vlákenné vrstvy s obsahem nanovláken (obr. 34 – 39)

**Příloha 5** – snímky struktury vzorků vlákenných vrstev se stejným podílem nanovláken a různou plošnou hmotností (obr. 40 - 43) a vlákenné vrstvy s rozdílným podílem nanovláken a stejnou plošnou hmotností (obr. 44 - 47) nasnímané rastrovacím elektronovým mikroskopem

**Příloha 6** – průměry vláken změřené pomocí softwaru Lucia G

**Příloha 7** – tabulka plošných hmotností vlákenných vrstev pro tři měření

**Příloha 8** – data získaná při měření na dvoumikrofonové impedanční trubici (k dispozici na CD)

---

## Příloha 1

Složení polymerního roztoku PVA:

1000 g 16 % PVA

9,6 ml 40 % Glyoxal

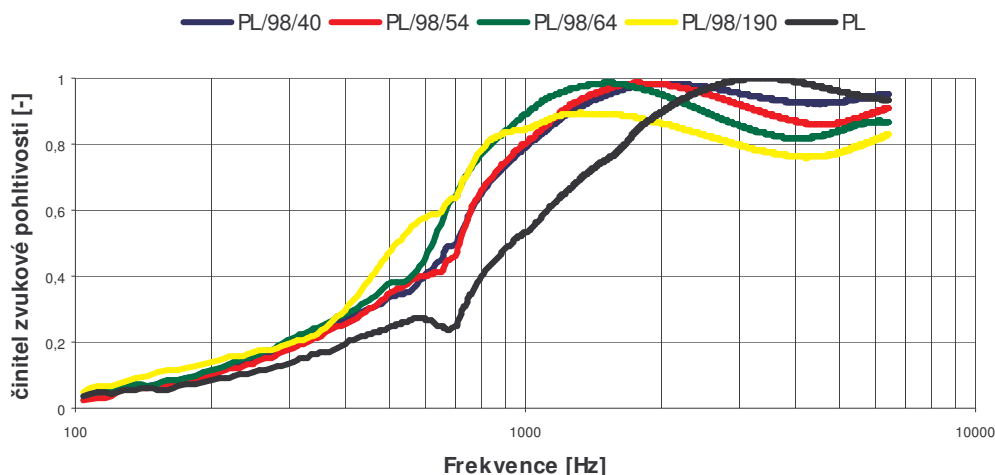
5 ml 85 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$

240 g  $\text{H}_2\text{O}$

---

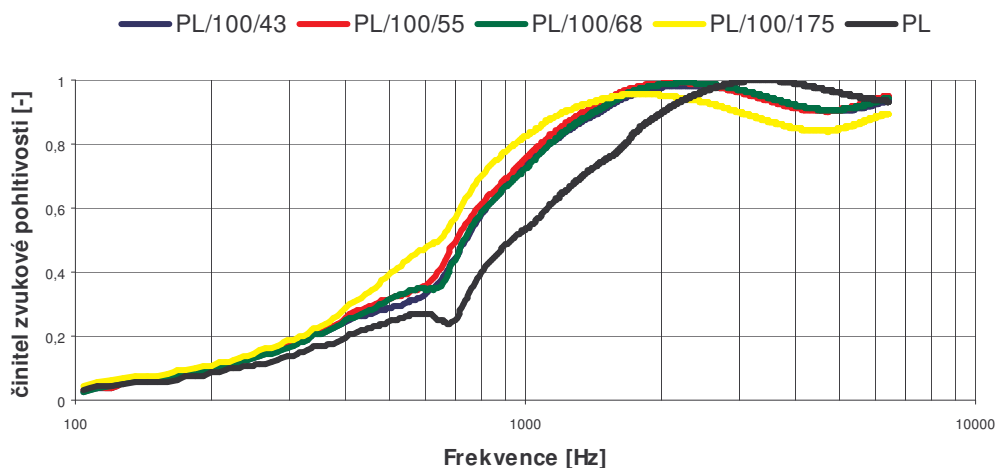
## Příloha 2

### Vliv plošné hmotnosti na činitel zvukové pohltivosti



Obr. 30: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenných vrstev se shodným podílem MB a NN vláken (2 % NN) a s rozdílnou plošnou hmotností (40, 54, 64 a 190 g/m<sup>2</sup>) na nosném podkladu z polyesterové vláknenné vrstvy (PL).

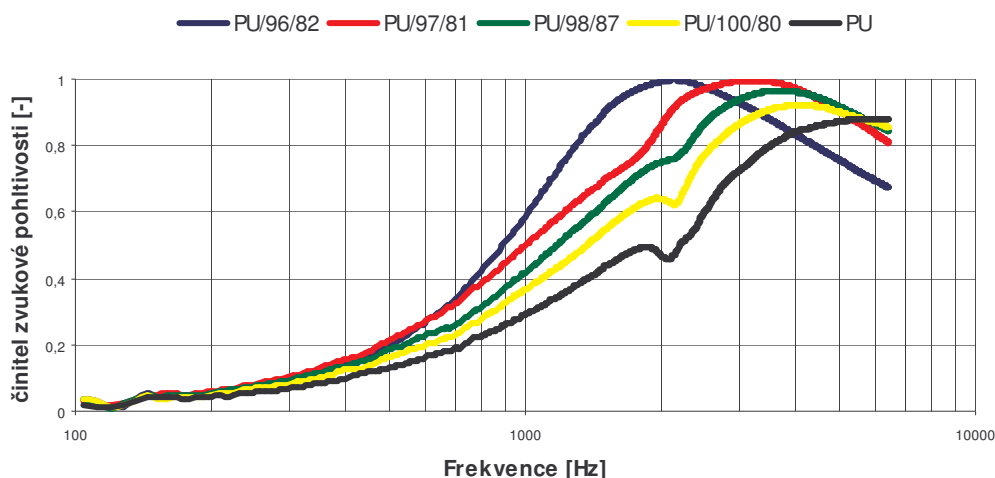
### Vliv plošné hmotnosti na činitel zvukové pohltivosti - MB



Obr. 31: : Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenných vrstev vyrobených pouze technologií meltblown a s rozdílnou plošnou hmotností (43, 55, 68 a 175 g/m<sup>2</sup>) přibližně odpovídající plošným hmotnostem vrstev zobrazených v grafu 30 na nosném podkladu z polyesterové vláknenné vrstvy (PL).

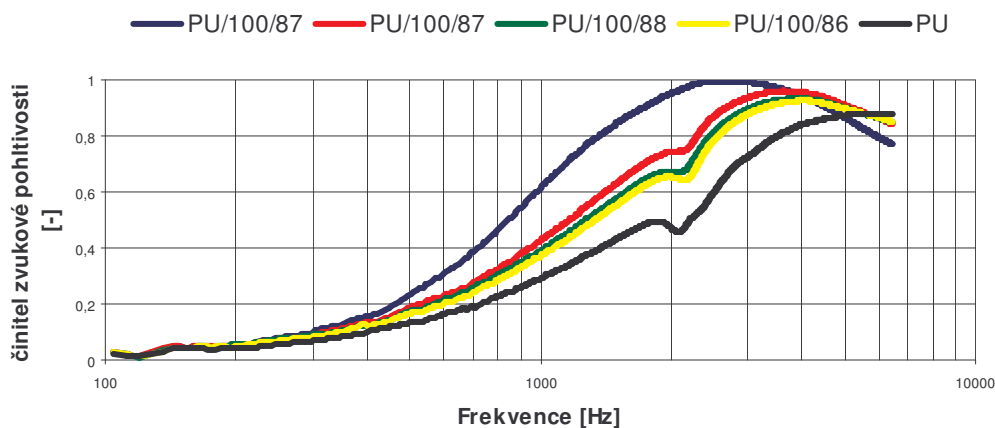
## Příloha 3

### Vliv množství nanovláken na činitel zvukové pohltivosti



Obr. 32: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenných vrstev s přibližně shodnou plošnou hmotností ( $82, 81, 87$  a  $80 \text{ g/m}^2$ ) a rozdílným podílem MB a NN vláken (4, 3, 2 a  $<1 \%$  NN) na nosném podkladu z polyuretanové pěny (PU).

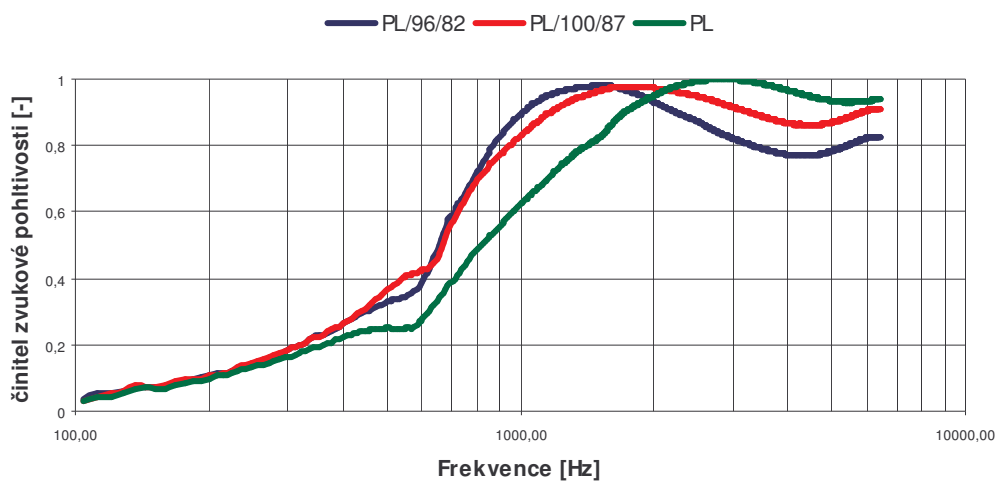
### Vliv množství nanovláken na činitel zvukové pohltivosti - MB



Obr. 33: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenných vrstev vyrobených pouze technologií meltblown s přibližně shodnou plošnou hmotností ( $87, 87, 88$  a  $86 \text{ g/m}^2$ ) téměř odpovídající plošným hmotnostem vrstev zobrazených v grafu 32 na nosném podkladu z polyuretanové pěny (PU).

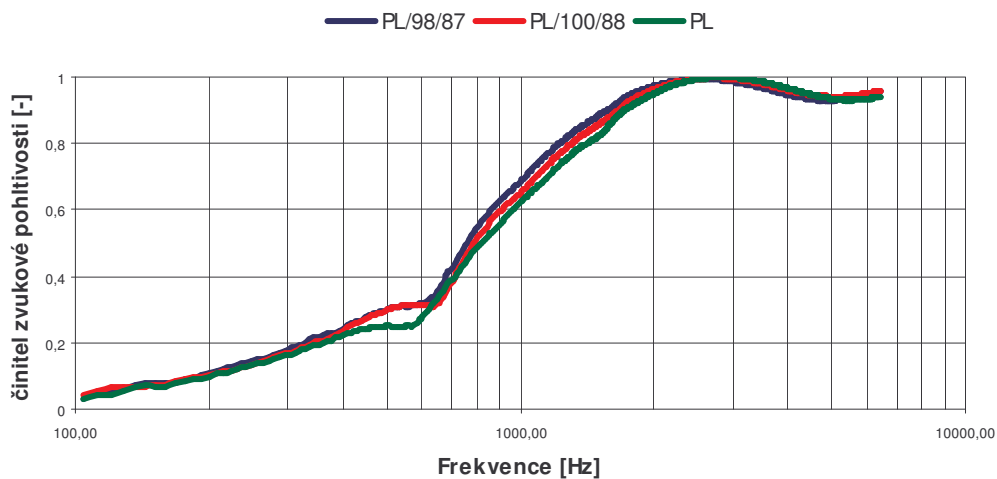
## Příloha 4

### Vliv složení materiálu na činitel zvukové pohltivosti

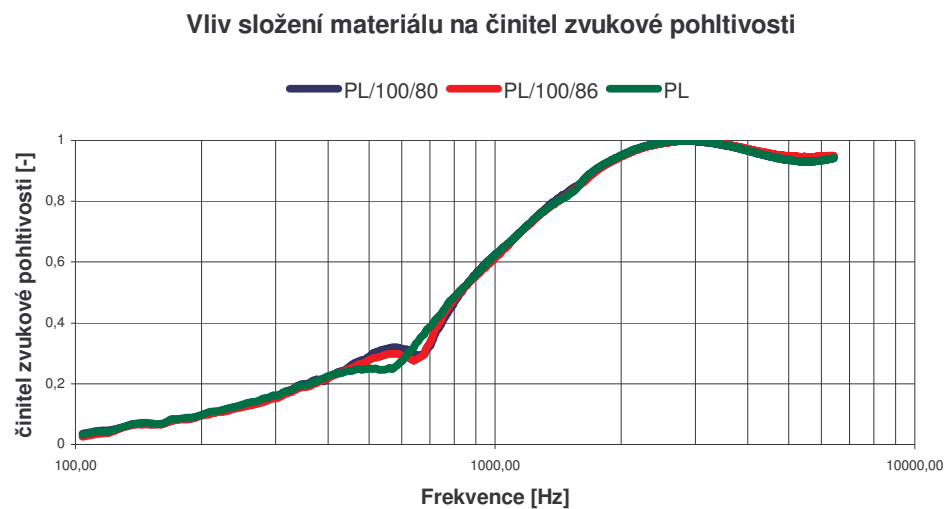


Obr. 34 Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenné vrstvy s obsahem nanovláken (4 % NN), samotného nosného materiálu z polyesterové vláknenné vrstvy PL a vláknenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown

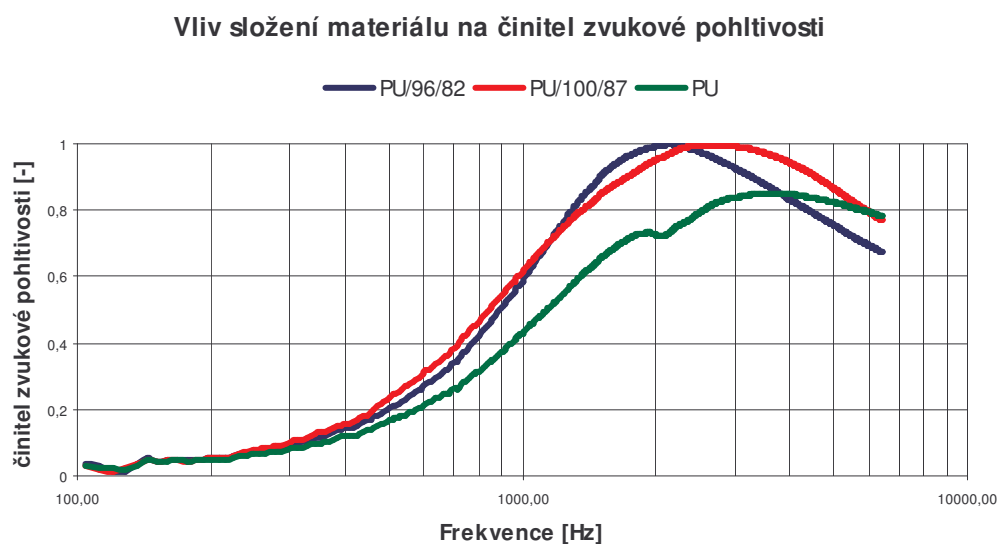
### Vliv složení materiálu na činitel zvukové pohltivosti



Obr. 35 Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenné vrstvy s obsahem nanovláken (2 % NN), samotného nosného materiálu z polyesterové vláknenné vrstvy PL a vláknenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown

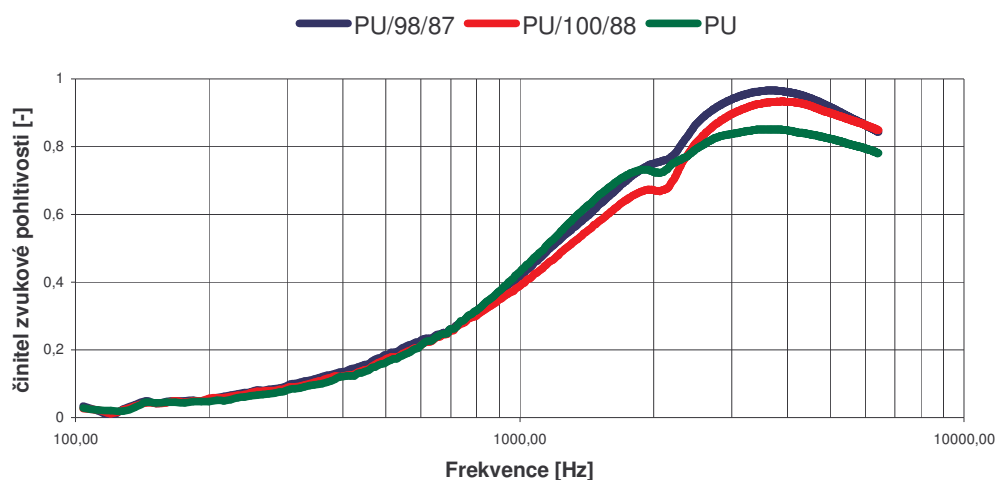


*Obr. 36 Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenné vrstvy s obsahem nanovláken (<1 % NN), samotného nosného materiálu z polyesterové vláknenné vrstvy PL a vláknenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown*



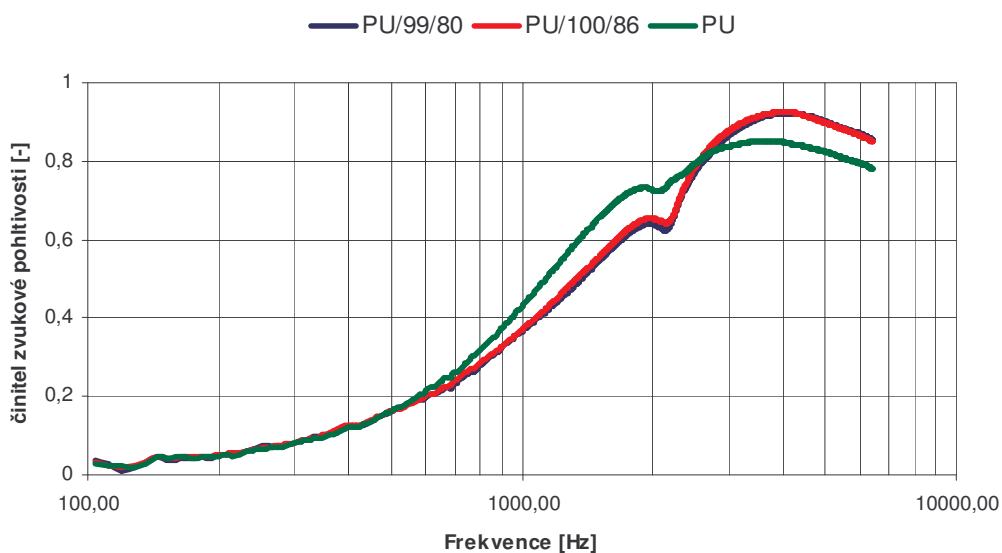
*Obr. 37 Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenné vrstvy s obsahem nanovláken (4 % NN), samotného nosného materiálu z polyuretanové pěny (PU) a vláknenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown.*

### Vliv složení materiálu na číselník zvukové pohltivosti



Obr. 38 Průběh číselníku zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenné vrstvy s obsahem nanovláken (2 % NN), samotného nosného materiálu z polyuretanové pěny (PU) a vláknenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown.

### Vliv složení materiálu na číselník zvukové pohltivosti

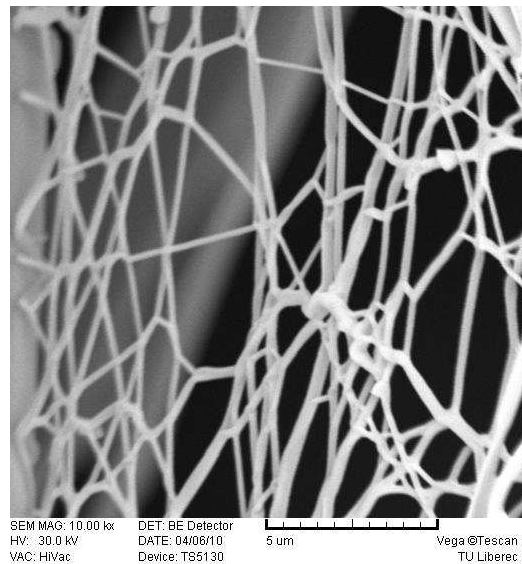
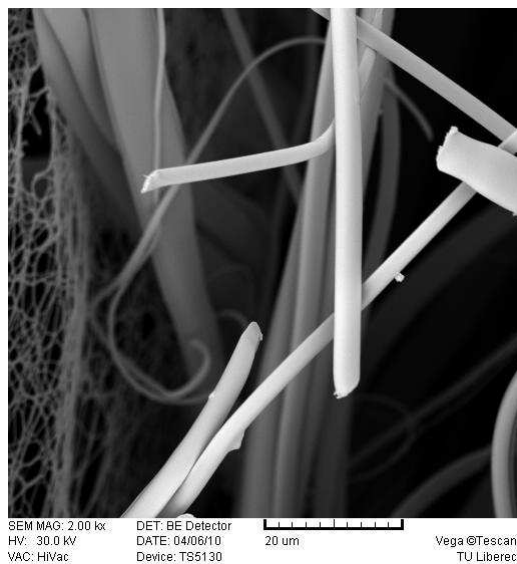


Obr. 39 Průběh číselníku zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření vláknenné vrstvy s obsahem nanovláken (<1 % NN), samotného nosného materiálu z polyuretanové pěny (PU) a vláknenné vrstvy vyrobené pouze technologií meltblown.

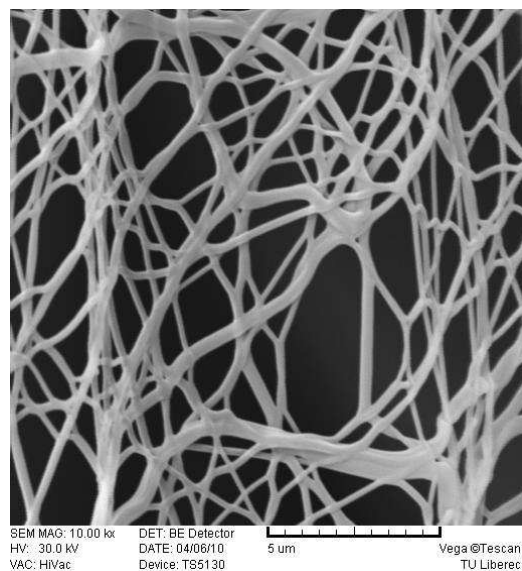
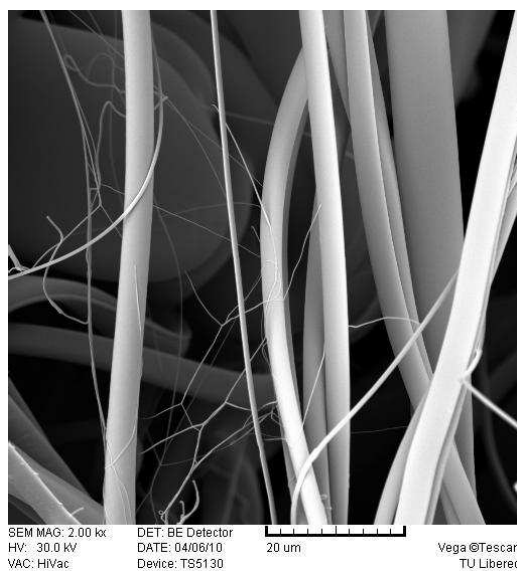
---

## Příloha 5

Snímky z rastrovacího elektronového mikroskopu:

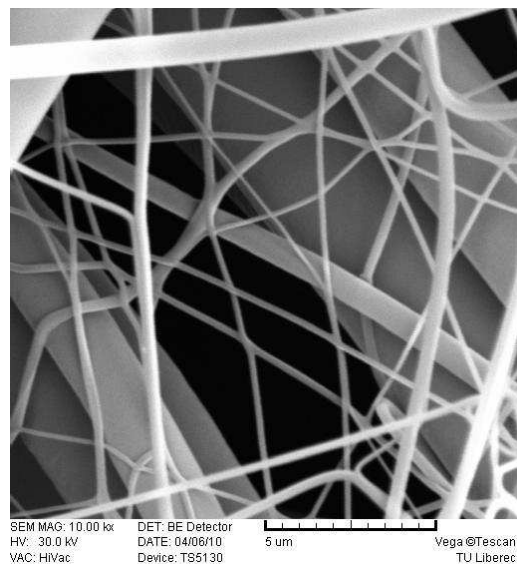
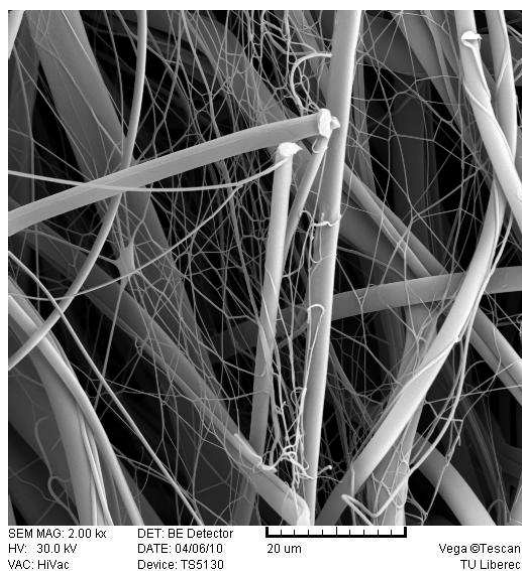


*Obr. 40 vzorek 98/40 zvětšený 2000x a 10000x*

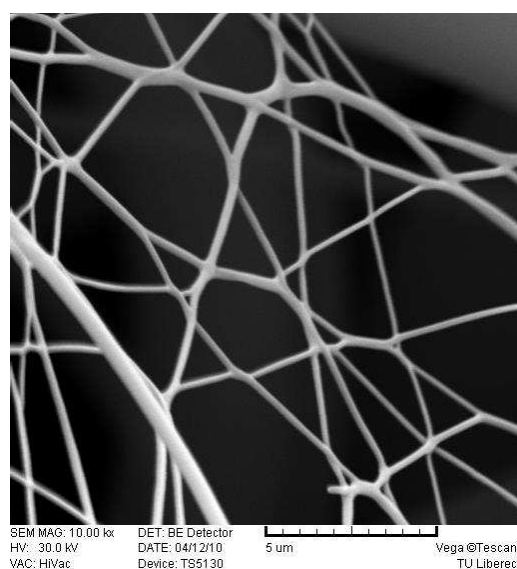
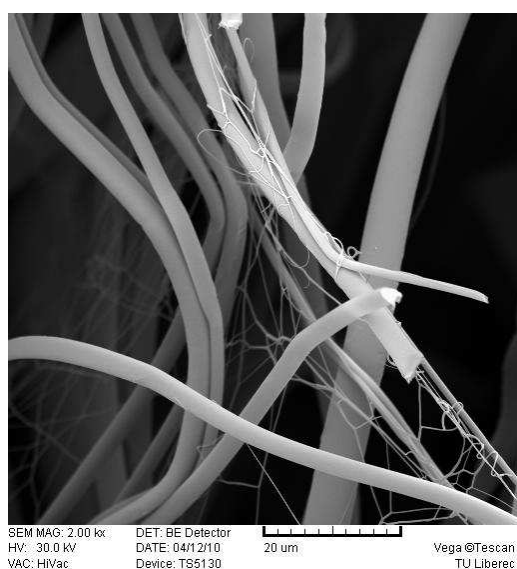


*Obr. 41 vzorek 98/54 zvětšený 2000x a 10000x*

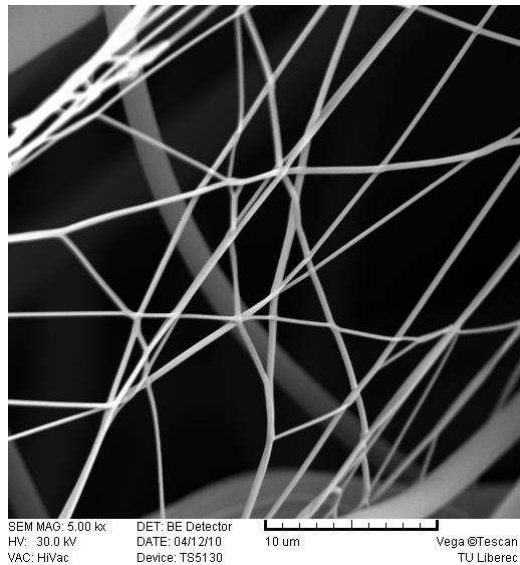
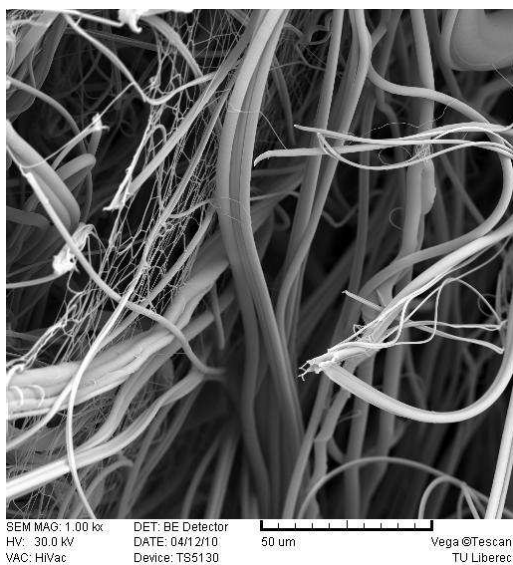




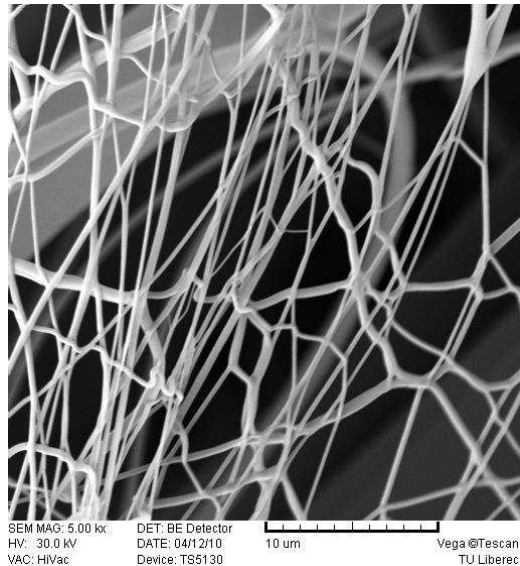
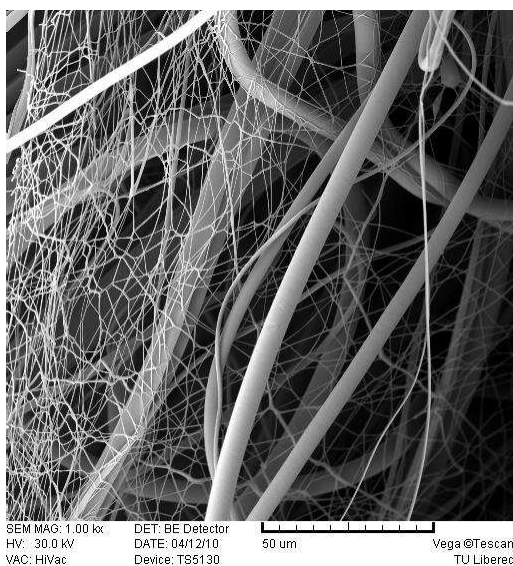
*Obr. 42 vzorek 98/64 zvětšený 2000x a 10000x*



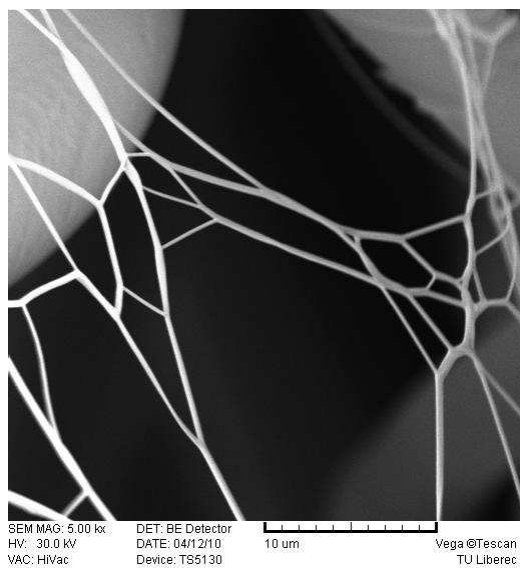
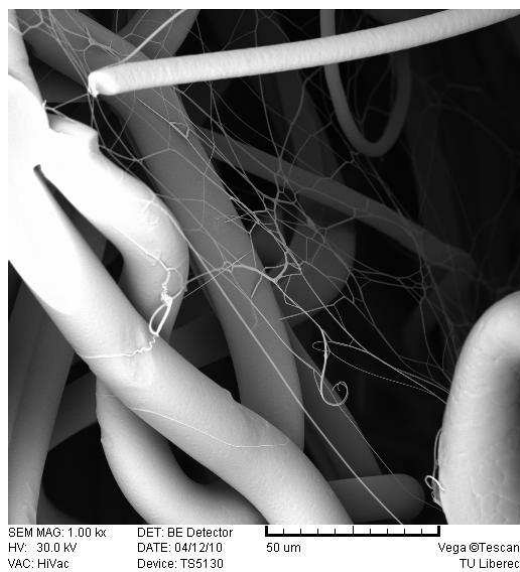
*Obr. 43 vzorek 98/190 zvětšený 2000x a 10000x*



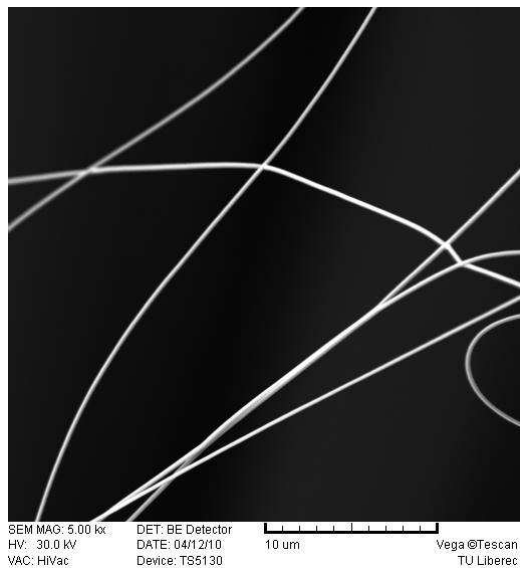
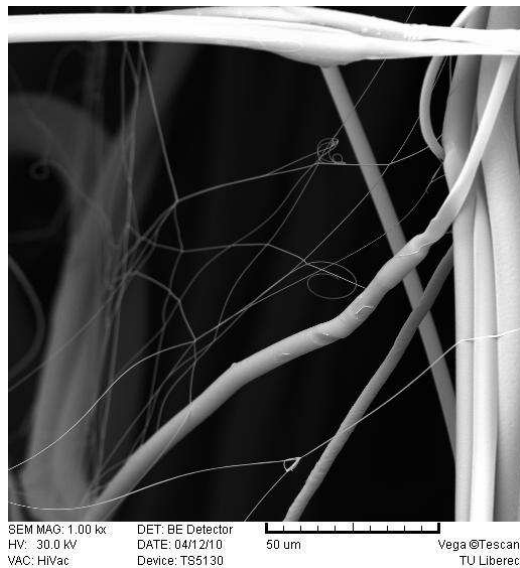
*Obr. 44 vzorek 96/82 zvětšený 1000x a 5000x*



*Obr. 45 vzorek 97/81 zvětšený 1000x a 5000x*



*Obr. 46 vzorek 98/87 zvětšený 1000x a 5000x*



*Obr. 47 vzorek 100/80 zvětšený 1000x a 5000x*

---

## Příloha 6

Tabulka průměrů vláken:

vzorek	průměr nanovláken [nm]	směrodatná odchylka [nm]	počet měření	průměr vláken MB [nm]	směrodatná odchylka [nm]	počet měření
98/40	240	56	46	3215	1418	15
98/54	218	57	68	3205	1898	18
98/64	216	97	44	3301	2032	18
98/190	184	49	44	2795	1130	18
96/82	319	69	40	2795	702	37
97/81	353	86	53	5039	1257	18
98/87	380	84	41	13383	5178	12
100/80	356	73	22	5715	2094	12

---

## Příloha 7

Tabulka plošných hmotností:

vzorek	průměrná plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	směrodatná odchylka [g/m <sup>2</sup> ]
98/40	40	4
98/54	54	2
98/64	64	3
98/190	190	4
100/43	43	2
100/55	55	3
100/68	68	1
100/175	175	4
96/82	82	4
97/81	81	4
98/87	87	2
100/80	80	3
100/87	87	3
100/87	87	5
100/88	88	2
100/86	86	4